

Бараночников М. Л.

МИКРОМАГНИТОЭЛЕКТРОНИКА



Том 1

ББК 32.844я73

Б24

Бараночников М.Л.

Б24 Микромагнитоэлектроника. Т. 1. – М: ДМК Пресс, 2001. – 544 с. ил. (Серия «Учебник»)

Электронная версия 373 с.

ISBN 5-94074-078-2

Посвящается новому направлению техники – микромагнитоэлектронике.

Состоит из двух частей. В первой части в доступной форме излагаются принципы работы современных преобразователей магнитного поля (элементов Холла, магниторезисторов, магнитодиодов, магнитотранзисторов и др.), а также изделий микромагнитоэлектроники, создаваемых на их основе (магниточувствительных и магнитоуправляемых ИС, магнитных датчиков и др.).

Приводятся схемы их сопряжения с др. электронными узлами. Рассматриваются некоторые области применения изделий микромагнитоэлектроники в различных областях техники.

Во второй части приводятся справочные данные по более, чем 2500 типономиналам изделий микромагнитоэлектроники, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами и некоторыми отечественными производителями.

Рекомендуется для инженерно-технических работников, специализирующихся в областях создания и эксплуатации современного оборудования и приборов, а также для студентов технических ВУЗов и подготовленных радиолюбителей.

Все права защищены. Любая часть этой книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами без письменного разрешения владельцев авторских прав.

Материал, изложенный в данной книге, многократно проверен. Но, поскольку вероятность технических ошибок все равно существует, издательство не может гарантировать абсолютную точность и правильность приводимых сведений. В связи с этим издательство не несет ответственности за возможные ошибки, связанные с использованием книги.

ISBN 5-94074-078-2

© Бараночников М. Л., 2001

© ДМК Пресс, 2001

Бараночников М.Л.

Микромагнитоэлектроника

ТОМ 1

**ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ
ИЗДЕЛИЙ МИКРОМАГНИТОЭЛЕКТРОНИКИ**

под общей редакцией
доктора физико-математических наук,
профессора Мордковича В.Н.

электронная авторская версия

г. Москва, 2002 г.

Предисловие

Среди современных технических средств немало устройств и объектов, работа которых основана на взаимодействии с магнитным полем или в которых последнее используется в качестве управляющей среды.

За минувшие двадцать лет опубликовано множество статей, патентов и авторских свидетельств на изобретения, а также монографий, посвященных теории преобразователей магнитного поля и принципам работы приборов, созданных на их основе.

Большой вклад в разработку этой темы внесли такие отечественные авторы книг и статей, как О. К. Хомерики [16], В. И. Стафеева. [4, 10, 15], А. Н. Марченко [9, 11], Г. А. Егизаряна [5, 6, 7, 8], М. М. Мирзабаева [12], Ю. В. Афанасьев [3] и многие другие.

Одной из самых удачных признана монография коллектива авторов во главе с Д. И. Агейкиным, посвященная датчикам различного назначения [1].

Некоторую информацию общего характера о преобразователях магнитного поля можно найти в справочнике под редакцией А. В. Нефедова [13].

За последнее десятилетие совершенствовались и оттачивались отдельные вопросы теории преобразователей магнитного поля, разрабатывались и внедрялись новые принципы их конструирования и технология производства. На мировом рынке появились принципиально новые приборы и устройства.

В результате синтеза микроэлектроники и интегральных магниточувствительных элементов (преобразователей магнитного поля) возникло новое научно-техническое направление – микромагнитоэлектроника. Развитие микромагнитоэлектроники позволяет разрабатывать и производить, современные магнитоэлектронные устройства и приборы.

Изделия микромагнитоэлектроники используются в системах управления производственными процессами, в автомобильной электронике, измерительной и вычислительной технике, в дефектоскопии, медицинских и бытовых приборах и т.д. Зарубежные фирмы производят в год несколько миллиардов изделий микромагнитоэлектроники.

Оценка возможностей и перспектив применения устройств и приборов микромагнитоэлектроники и их очевидных преимуществ перед другими группами изделий электронной техники, выполняющих сходные функции, показывает, что в России это научно-техническое направление практически не освоено.

Несмотря на быстрое развитие микромагнитоэлектроники и ее широкое внедрение в различные отрасли науки и техники, в отечественной специальной литературе эти вопросы освещены слабо.

Такое положение объясняется как экономическими трудностями и стагнацией производства изделий микроэлектроники, так и распадом творческих коллективов научных и инженерно-технических работников, что привело к резкому снижению, начиная с 1991–92 гг., количества научно-технических публикаций и к вакууму информации в данной области.

Одновременно с этим в России значительно возрос интерес молодежи к учебе в средних специальных и высших образовательных заведениях и приобретению профессиональных навыков. Количество студентов технических ВУЗов уже в 1997–98 гг. превысило уровень 1991–92 гг.

В сложившейся ситуации возникла необходимость некоторого критического осмысления и обобщения теоретических и практических результатов разработки и применения изделий микромагнитоэлектроники.

Одновременно с попыткой решить указанную задачу автор счел целесообразным в настоящей работе познакомить читателей с новыми перспективными приборами, о которых еще нет сведений в специальной литературе.

Материалы для книги взяты, из отечественных и зарубежных печатных изданий, а также использованы работы самого автора.

В книге систематизированы и в доступной форме изложены основные сведения о различных типах современных преобразователей магнитного поля и о приборах, созданных на их основе.

Книга состоит из двух томов.

Первый том содержит восемь глав, в которых рассматриваются принципы функционирования основных изделий микромагнитоэлектроники.

Глава 1 знакомит читателя с основными понятиями, направлениями и тенденциями развития микромагнитоэлектроники.

В главе 2 описаны физические основы функционирования наиболее известных типов преобразователей магнитного поля (ПМП). Рассматриваются особенности применения различных ПМП (элементов Холла, магниторезисторов, магнитодиодов, магнитотранзисторов и др.), приводятся схемы сопряжения приборов с внешними цепями и устройствами.

Глава 3 знакомит с принципами работы магниточувствительных (МЧМС) и магнитоуправляемых (МУМ) интегральных схем и особенностями их применения. В этой главе приводятся функциональные схемы, параметры и характеристики МЧМС и МУМ.

В главе 4 приведены общие сведения о многоэлементных и многоканальных преобразователях магнитного поля.

В главе 5 описаны принципы работы микроэлектронных магнитных датчиков различного назначения, в том числе, датчиков перемещения, приближения, угла поворота и угла наклона, датчиков положения ротора вентильных электродвигателей и датчиков скорости вращения. Даны характеристики датчиков тока и напряжения. Приведены функциональные схемы различных типов датчиков, реализуемых с применением преобразователей магнитного поля.

Глава 6 знакомит с принципами работы магнитоэлектронных устройств различного назначения: В главе 5 описаны принципы работы микроэлектронных магнитных датчиков различного назначения, в том числе, датчиков перемещения, приближения, угла поворота и угла наклона, датчиков положения ротора вентильных электродвигателей и датчиков скорости вращения. Даны характеристики датчиков тока и бесконтактных концевых выключателей, клавишных модулей и переменных резисторов. Рассматриваются принципы функционирования и примеры построения магнитоэлектронных устройств для определения направления на источник магнитного поля (электронных компасов), для использования в аппаратуре неразрушающего контроля ферромагнитных изделий (дефектоскопии), а также в аппаратуре для предсказания магнитных бурь и др.

В главе 7 приводятся общие сведения об основных элементах изделий микромагнитоэлектроники и о материалах, используемых для их изготовления.

В главе 8 рассмотрены принципы измерения основных параметров наиболее распространенных типов преобразователей магнитного поля: элементов Холла, магниторезисторов, магнитодиодов, магниточувствительных и магнитоуправляемых интегральных микросхем. Содержание этой главы будет полезно при самостоятельной оценке параметров ПМП в «домашних» условиях.

Во втором томе книги содержатся справочные сведения о наиболее известных типах изделий микромагнитоэлектроники.

Второй том состоит из двадцати двух глав (9-31). В главах 9–25 приводятся основные параметры и характеристики наиболее известных изделий микромагнитоэлектроники, выпускаемых отечественными и зарубежными производителями, в том числе преобразователей магнитного поля, магниточувствительных и магнитоуправляемых ИС, датчиков положения, скорости вращения, угла поворота и угла наклона, датчиков тока и напряжения и др. Даны рисунки их общего вида, функциональные схемы и таблицы назначения выводов.

В главе 26 рассмотрены характеристики некоторых типов постоянных магнитов, используемых в устройствах микромагнитоэлектроники.

В книге даны основные характеристики более чем на 2500 типоминималов изделий микромагнитоэлектроники.

В главе 27 приводятся сведения о бытовых и промышленных источниках магнитного поля, воздействующих на человека.

В главе 28 приводятся таблицы параметров и единиц, используемых отечественными и зарубежными специалистами, работающими в области микромагнитоэлектроники, а также таблицы для взаимного перевода некоторых величин.

В главах 29 и 30 даны ориентировочные цены на некоторые типы изделий и перечень более 200 зарубежных фирм, работающих в области создания изделий микромагнитоэлектроники.

В главе 31 дается перечень изделий, сведения о которых приведены в настоящем издании.

Приведенные в книге сведения справочного назначения не только иллюстрируют возможности изделий микромагнитоэлектроники, но и могут служить обобщенным информационным материалом для инженеров, занимающихся проектированием и обслуживанием автоматизированного оборудования и современной бытовой техники. Кроме того, эта информация, дает возможность российским специалистам применять зарубежные изделия микромагнитоэлектроники для решения технических задач.

Книга рассчитана на подготовленного читателя, а потому содержит минимум теоретических материалов.

В издании более 1200 иллюстраций, свыше 100 схем включения изделий микромагнитоэлектроники в составе узлов и приборов различного назначения. Некоторые примеры практического применения изделий и электрические схемы приводятся без объяснений.

Приведенные в книге формулы могут использоваться читателем как обоснованный инструмент для простого аналитического определения основных параметров преобразователей магнитного поля и приборов, создаваемых с их применением. Это важно как при проектировании соответствующей аппаратуры, так и при использовании изделий микромагнитоэлектроники в конкретных устройствах различного назначения.

Часть текста набрана петитом, и подготовленный читатель может его пропустить.

Надеюсь, что систематизированный и приведенный в книге материал удовлетворит интерес инженерно-технических работников, молодых специалистов и радиолюбителей к новому направлению техники и поможет им совершенствовать существующие и создавать новые устройства на основе изделий микромагнитоэлектроники.

Автор выражает глубокую признательность рецензенту и научному редактору книги доктору физико-математических наук В.Н. Мордковичу за множество ценных замечаний, поправок и за доброжелательную критику, что в значительной степени помогло улучшить содержания книги.

Глава 1. Микромагнитоэлектроника – новое направление техники

Многие происходящие явления и процессы, так или иначе, связаны с магнитным полем (МП). В современной технике существует немало различных объектов и устройств, работа которых основана на взаимодействии с МП или в которых последнее используется в качестве управляющей среды.

Влияние магнитных полей настолько велико, что весьма актуальными являются задачи по контролю МП, их изучению и эффективному применению в науке, технике и быту.

Основным элементом объектов и устройств, использующих магнитное поле, является преобразователь магнитного поля (ПМП), который обеспечивает преобразование магнитного потока в электрический сигнал.

При создании ПМП используются различные физические явления, происходящие (возникающие) в полупроводниках и металлах при взаимодействии с магнитным полем.

Эти явления, известные как эффекты Холла и Гаусса, были открыты в конце девятнадцатого века (в 1879 г.). Однако в практической деятельности их начали использовать спустя три четверти века, когда успехи в материаловедении и технологии позволили наладить промышленный выпуск дискретных преобразователей магнитного поля, (в основном, так называемых «монокристаллических» датчиков Холла и магниторезисторов), которые стали широко применяться в науке и технике.

Использование преобразователей магнитного поля первого поколения позволило существенно повысить надежность и эксплуатационные характеристики многих устройств автоматики и вычислительной техники, уменьшить их габариты и стоимость [16].

Стремительное развитие в последние три десятилетия точного машиностроения и «точной» металлургии, автоматизации и телемеханики, вычислительной и информационной техники, наряду с достижениями в области технологии изготовления полупроводниковых приборов, привело к возникновению нового направления техники, которое по аналогии с фотоэлектроникой [2] назвали магнитоэлектроникой.

Интенсивное развитие магнитоэлектроники объясняется такими достоинствами ПМП, как возможность полной электрической развязки входных и выходных цепей аппаратуры, бесконтактное преобразование малых механических перемещений в электрические сигналы, детектирование величины и направления индукции магнитного поля с высокой локальностью, создание бесконтактных («неисключающих») коммутаторов электрических цепей, бесконтактное измерение токов и напряжений и т.д.

Благодаря успехам магнитоэлектроники было создано второе поколение дискретных преобразователей магнитного поля и, освоено их промышленное производство. К устройствам второго поколения, характеризующимся высокими магнитоэлектрическими и эксплуатационными характеристиками, широкой номенклатурой приборов и значительными объемами их производства, относятся интегральные элементы Холла, тонкопленочные магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы и т.п.

Каждый из перечисленных дискретных преобразователей магнитного поля имеет определенный набор параметров и характеристик, обладает установленными преимуществами и особенностями, которые учитываются при проектировании магнитоэлектронной аппаратуры в зависимости от конкретных условий ее применения.

Общим для всех указанных приборов (дискретных ПМП) является то, что каждый из них, по совокупности параметров и возможностей, является всего-навсего магниточувствительным элементом электронного датчика, то есть «Частью электронного датчика, осуществляющей функцию восприятия контролируемых параметров среды или объекта и адекватного преобразования их значений в значения собственных электрических параметров» [1].

Функции дискретных ПМП существенно ограничены, практически все они требуют специального источника питания. Напряжение сигнала (или ток сигнала), снимаемое с выхода этих приборов, как правило, характеризуется минимальной величиной (от долей до десятков милливольт или микроампер), что затрудняет их использование в высокочувствительной аппаратуре и оборудовании.

Магнитная чувствительность ПМП в составе аппаратуры во многом зависит от правильного выбора его режима работы и степени согласования преобразователя с последующим электронным трактом. Наличие открытого входа электронного тракта, протяженных электрических соединений ПМП со схемой усиления сигнала, неудачно выбранные температурный и электрический режимы, а также неоптимальное согласование с нагрузкой часто не позволяют реализовать потенциально высокую чувствительность преобразователя магнитного поля.

С повышением требований к параметрам и эксплуатационным характеристикам современной аппаратуры и приборов в последние годы, на преобразователи магнитного поля нового поколения стали возлагаться функции, которые ранее выполнялись элементами и узлами самой аппаратуры.

Совмещение нескольких функций в одном изделии, имеющем, как правило, единую конструкцию, дает выигрыш не только в реализуемой магнитной чувствительности ПМП, но и приводит к значительному уменьшению габаритов магнитоэлектронной аппаратуры, повышению надежности и снижению ее стоимости.

В настоящее время в сфере деятельности «сложных» преобразователей магнитного поля отсутствуют

многих термины и понятия, обычно устанавливаемых нормативными (государственными, отраслевыми) документами. Однако, по аналогии с фотоприемными устройствами (ФПУ), выполняющими в ряде случаев сходные с ПМП функции [2], попытаемся дать определение этому устройству.

Устройства, которые выполняют кроме преобразования магнитного поля и иные функции, и в которых в одном корпусе размещаются магниточувствительный элемент, электронная схема обработки сигнала, а также другие элементы, расширяющие функции указанных изделий, будем называть магнитоэлектронными устройствами.

На рис. 1.1 в качестве примера приведена обобщенная функциональная схема простого одноканального магнитоэлектронного устройства (МЭУ).

В данном устройстве происходят последовательные преобразования магнитного поля в выходной электрический сигнал. В общем случае в простом МЭУ основные структурные элементы, выполняющие следующие функции:

Магнитная система формирует магнитный поток в соответствии с назначением устройства и (или) обеспечивает защиту ПМП от воздействия посторонних магнитных полей.

Преобразователь магнитного поля осуществляет преобразование поля в изменение электрофизических свойств или состояния магниточувствительного элемента.

Согласующий каскад обеспечивает оптимальное согласование ПМП с выходом электронного тракта устройства и (или) предварительное усиление сигнала ПМП.;

Усилитель осуществляет дальнейшее усиление сигнала и его предварительную обработку (фильтрацию, обеспечение заданной полосы пропускания и т.д.).

Пороговое устройство осуществляет дискриминацию уровня сигнала (формирование сигнала с прямоугольными фронтами).

Усилитель мощности обеспечивает усиление сигнала по току (или по напряжению) и оптимальное согласование МЭУ с внешней нагрузкой.

Схема управления обеспечивает установку (регулировку) порога срабатывания (индукции срабатывания/отпускания) и (или) регулировку магнитной чувствительности МЭУ.

Стабилизатор режимов работы обеспечивает стабильность параметров МЭУ при питании его от нестабильного источника и неконтролируемом изменении температуры окружающей среды.

В современных, более сложных МЭУ могут содержаться и другие элементы, которые, кроме перечисленных функций, осуществляют термостабилизацию магниточувствительного элемента; защиту устройства от воздействия «сверхнизких» и «сверхвысоких» напряжений и коротких замыканий по выходу, защиту от перегрева и ошибочного изменения полярности источников питания, аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов ПМП и сигналов управления магнитоэлектронным устройством и др.

Дальнейшее развитие технологии производства полупроводниковых приборов и интегральных схем привело к созданию третьего поколения преобразователей магнитного поля.

Технология изготовления подавляющего большинства современных преобразователей магнитного поля, в одноэлементном и в многоэлементном исполнении базируется на тех же принципах, что и производство полупроводниковых приборов и интегральных микросхем (с использованием процессов диффузии, ионного легирования, фотолитографии, микросварки и т.п.).

Преобразователь магнитного поля МЭУ третьего поколения и схемы электронного обрамления указанных устройств, изготавливаются полностью с использованием технологии микроэлектроники, как на отдельных полупроводниковых структурах, так и в одном кристалле с интегральным ПМП (магниточувствительным элементом).

Сложные МЭУ кроме магниточувствительных элементов, могут содержать и элементы, реагирующие на иные физические воздействия, например, фотоприемники, регистрирующие оптическое излучение. В этом случае электронный тракт МЭУ реализует параметры двух чувствительных элементов. Кроме того, отдельные типы ПМП сами являются фотоприемниками (например, элементы Холла, магнитодиоды и магнитотранзисторы).

Кроме того, в состав сложных МЭУ могут входить, магнитные системы, а также электронные схемы, производящие полную обработку поступившей информации: усиление сигнала ПМП, фильтрацию, аналого-цифровое преобразование, математическую обработку и согласование с аппаратурой потребителя (полный интерфейс).

Таким образом, направление техники, возникшее на основе синтеза современной микроэлектроники, интегральных магниточувствительных элементов (преобразователей магнитного поля), точного машиностроения и микротехнологий, можно назвать микромагнитоэлектроникой.

Микромагнитоэлектроника является базой для разработки и производства современных магнитоэлектронных устройств.

Это направление позволяет реализовать высокие параметры магниточувствительных элементов в аппаратуре, расширить функции ПМП, а также успешно решать задачи микроминиатюризации магнитоэлектронных приборов и оборудования, повышения их надежности, уменьшения габаритов, массы,

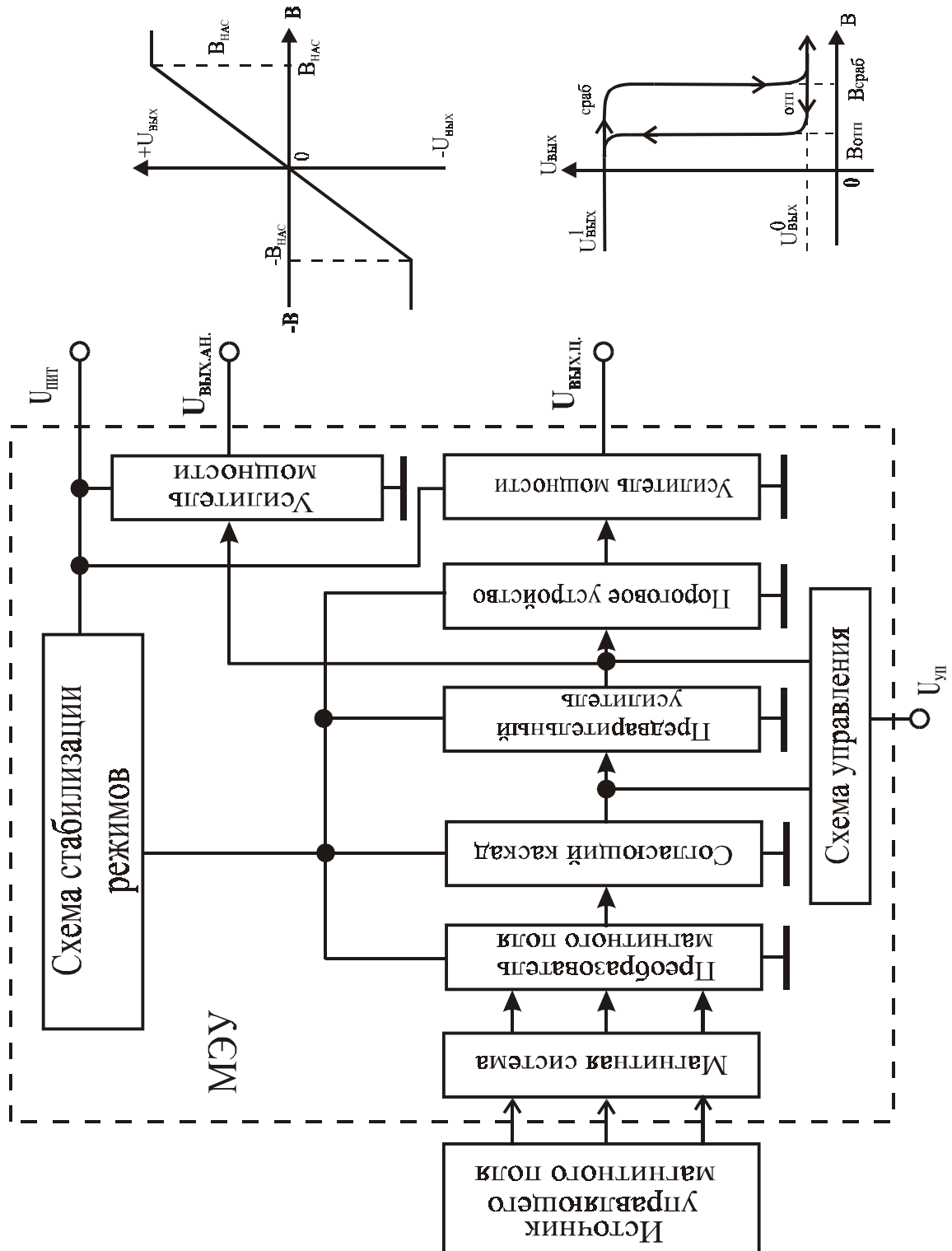


Рис. 1.1. Обобщенная функциональная схема простого одноканального магнитоэлектронного устройства

потребляемой мощности и снижения себестоимости.

Конкретная реализация данного направления заключается в создании и обеспечении промышленного производства микроминиатюрных магнитоэлектронных устройств (ММЭУ). Эти устройства, состоят из магниточувствительного элемента и схемы обработки электрического сигнала, объединены единым корпусом, и изготовлены с применением интегральной (гибридной или твердотельной) технологии.

Основные направления развития микромагнитоэлектроники показаны на рис. 1.2.. Из рисунка видно, что микромагнитоэлектроника развивается по четырем основным направлениям. Это разработка и производство:

- преобразователей магнитного поля (магниточувствительных элементов);
- магнитоуправляемых и магниточувствительных интегральных схем;
- магнитных датчиков;
- функциональных магнитоэлектронных устройств.

Развитие технологии изготовления современных преобразователей магнитного поля идет не только по пути интеграции совмещаемых с ними функций, но и в направлении наращивания числа магниточувствительных элементов в одном изделии (устройстве).

Использование многоэлементных магниточувствительных преобразователей создает возможности для разработки многоканальных магнитоэлектронных устройств, что обеспечивает решение целого ряда принципиально иных задач, например:, для построения двух- и четырехкоординатных магнитных датчиков положения и направления; многоразрядных высокоточных преобразователей типа «угол–код», многоканальных МЭУ для комплектации портативных систем визуализации магнитного поля и др.

Многоканальные МЭУ могут содержать: коммутаторы каналов, цифро-аналоговые и аналого-цифровые преобразователи, устройства памяти, выборки и хранения, схемы интерфейса, знаковые и графические индикаторы и др.

Простейшими магнитоэлектронными устройствами являются магнитоуправляемые и магниточувствительные микросхемы, а также современные магнитные датчики. Элементная база магнитоэлектронных устройств показана на рис. 1.3.

Третьей большой группой изделий микромагнитоэлектроники являются функциональные магнитоэлектронные устройства (ФМЭУ) – (см. рис. 1.4).

Функциональные магнитоэлектронные устройства – это сложные изделия электронной техники, выполняющие самостоятельные и вполне определенные функции. .

В отличие от магнитных датчиков эти устройства могут выполнять не только преобразовательные функции, но и использовать генерируемый сигнал непосредственно для управления объектом и (или) индикации его состояния.

ФМЭУ содержат дополнительные элементы (функциональные электронные узлы, валы, пружины, поводки, кодирующие диски, тонармы, муфты и т.д.), которые обеспечивают выполнение заданных функций. Функциональные магнитоэлектронные устройства сконструированы так, что все их узлы и детали «неразрывно» связаны между собой и представляют единое целое.

Примером простого функционального магнитоэлектронного устройства может служить бесконтактный кнопочный переключатель, содержащий: магнитную систему, магнитоуправляемую микросхему, арматуру (плунжер, возвратная пружина и др.), выходные контакты и литой пластмассовый корпус. Это устройство выполняет определенные и конкретные функции – замыкает или размыкает электрическую цепь при нажатии на плунжер (или другой. приводной элемент).

Примером более сложного ФМЭУ, может служить бесконтактный преобразователь типа «угол–код».

В разряд ФМЭУ входит и, бесконтактный электронный предохранитель (реле тока), который размыкает электрическую цепь при увеличении контролируемого тока за допустимые пределы.

Функциональные магнитоэлектронные устройства являются последним поколением изделий микромагнитоэлектроники, создание которых стало возможным благодаря достижениям микроэлектроники, точной механики и других отраслей техники.

В зарубежной технической литературе приводится немало примеров создания функциональных магнитоэлектронных устройств различного назначения, (названия некоторых из них приведены на рис. 1.4).

1.1. Производство изделий микромагнитоэлектроники

Номенклатура изделий микромагнитоэлектроники и объемы их производства в мире достигли внушительных размеров. Эти изделия используются в различных областях техники, в науке и бытовой аппаратуре. Суммарный годовой объем их производства составляет несколько миллиардов штук..

В России и за ее пределами наибольшее распространение получили несколько групп изделий.

К ним относятся, прежде всего, дискретные преобразователи магнитного поля, которые представляют собой основную группу изделий микромагнитоэлектроники (элементы Холла и магниторезисторы, магнитодиоды и магнитотранзисторы), и интегральные приборы (магниточувствительные и магнитоуправляемые ИС), а также магнитные датчики различного назначения.

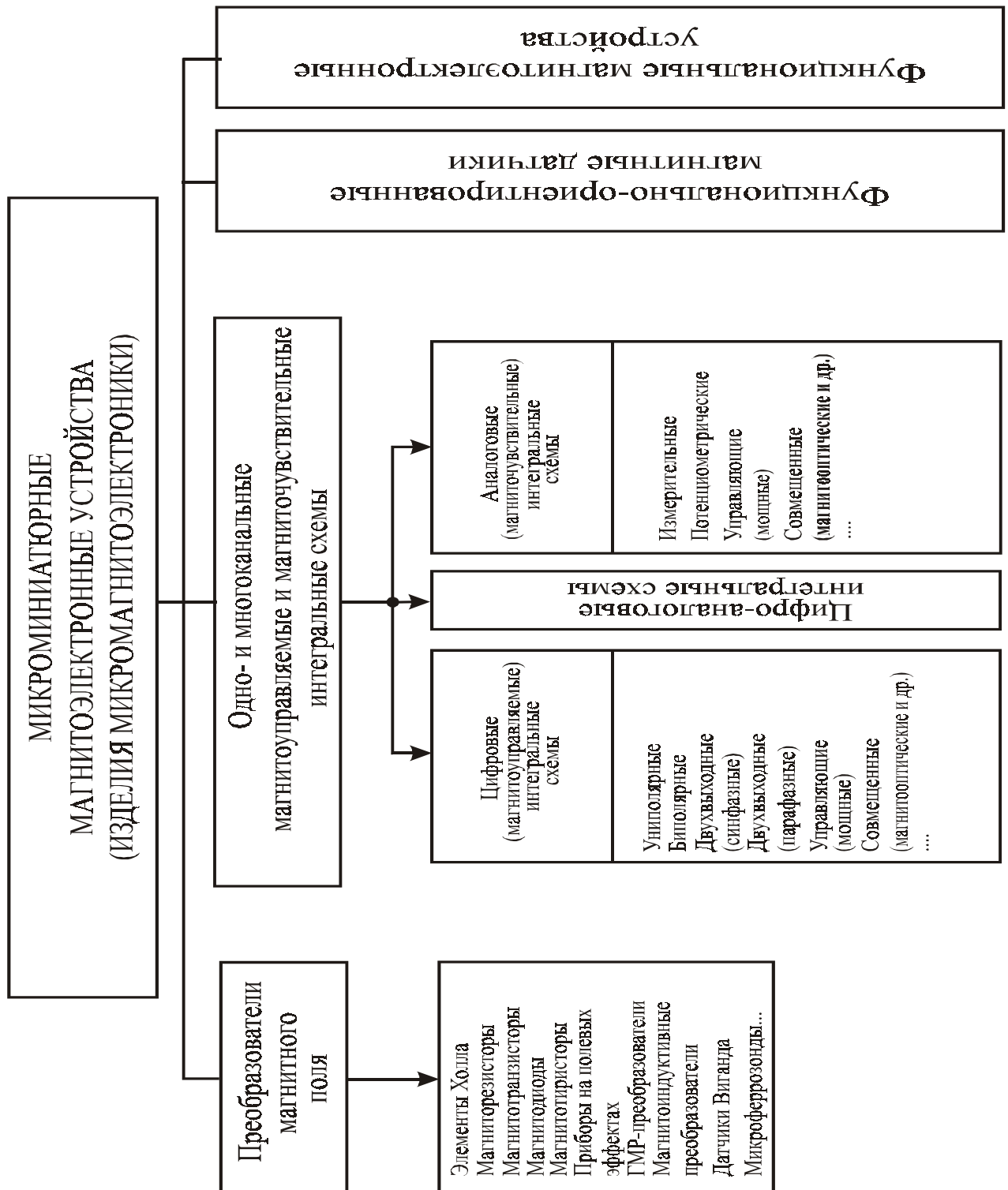


Рис. 1.2. Основные направления развития микромагнитоэлектроники

Элементы Холла(ЭХ). В настоящее время они являются самыми распространенными изделиями микромагнитоэлектроники.

Разработкой и выпуском элементов Холла занимаются несколько десятков зарубежных фирм. В этом направлении работают и некоторые отечественные предприятия. Суммарный годовой объем производства элементов Холла в мире превышает 1 млрд. шт. Номенклатура типов ЭХ насчитывает сотни наименований.

Магниторезисторы. Наибольшее распространение получили две группы магнито-резисторов: «монолитные» и тонкопленочные. Имеются сведения о том, что некоторые предприятия в России осуществляют выпуск таких приборов. Однако основными производителями магниторезисторов являются зарубежные фирмы, которые выпускают сотни миллионов этих изделий в год.

Магнитодиоды и магнитотранзисторы. Выпуском дискретных магнитодиодов и магнитотранзисторов занимаются многие зарубежные фирмы. Эти приборы наиболее часто используются в составе интегральных изделий микромагнитоэлектроники, например в магниточувствительных и магнитоуправляемых ИС. Сведений о серийном производстве указанных изделий в России нет.

Магниточувствительные (МЧМС) и магнитоуправляемые (МУМ) интегральные схемы. За рубежом такие схемы называются схемами Холла (Holl-effect integrated circuits). Зарубежные фирмы выпускают сотни типов кремниевых магнитоуправляемых и магниточувствительных микросхем. Возобновляется выпуск МЧМС и МУМ в нашей стране. По косвенной оценке суммарный годовой объем их производства превышает 100 млн. шт.

Элементы Холла, магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы, МЧМС и МУМ используются, как правило, в качестве магниточувствительных элементов более сложных изделий микромагнитоэлектроники.

Магнитные датчики составляют внушительную группу изделий микромагнитоэлектроники. Зарубежными фирмами на основе интегральных преобразователей магнитного поля (магниточувствительных и магнитоуправляемых интегральных схем, магниторезисторов и др.) серийно выпускается широкая номенклатура микроэлектронных магнитных датчиков различного назначения, в том числе: датчиков приближения, перемещения, скорости вращения валов и шестерен, преобразователей типа «угол–код» и т.д. Магнитные датчики являются важнейшими элементами автоматизированных систем различного назначения. Эти устройства, широко применяются в производстве, науке, технике, в бытовых приборах и т.п. На рис. 1.4 приведены некоторые области их применения.

Выпуском магнитных датчиков занимаются сотни зарубежных фирм и некоторые отечественные предприятия. Суммарный годовой объем производства этих изделий составляет несколько сотен миллионов штук.

Более подробные сведения о параметрах, особенностях и производстве дискретных преобразователей магнитного поля, МЧМС, МУМ и магнитных датчиков приводятся в следующих главах.

Функциональные магнитоэлектронные устройства. Рассмотрим подробнее эту, группу приборов.

В отечественных источниках иногда встречается информация о создании ФМЭУ, однако в большинстве своем эти изделия пока не вышли за рамки макетных и экспериментальных образцов.

Примером промышленной реализации простого ФМЭУ могут служить бесконтактные кнопочные переключатели типа ПКБ (ПКБ1 – ПКБ5), годовой объем производства которых в 1989–90 гг. составлял в СССР примерно полмиллиона штук. В зарубежной технической литературе можно найти немало примеров создания функциональных магнитоэлектронных устройств различного назначения, (названия некоторых из них приведены на рис. 1.4).

Номенклатура ФМЭУ, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, значительно богаче отечественной.

Например, фирма Bosch (Германия) выпускает бесконтактные замки зажигания для автомобилей; фирма Honeywell производит бесконтактные кнопочные переключатели, электронные предохранители и реле тока, концевые выключатели; фирма Murata (США) освоила выпуск бесконтактных потенциометров, декодеров, вакуумных переключателей, головок для считывания информации с магнитных карт и казначейских билетов; фирма Allegro Micro System выпускает интегральные преобразователи частоты для непосредственного управления обмотками статора бесколлекторного (вентильного) электродвигателя постоянного тока и т.д.

Фирмой Valvo (Германия) разработан и реализован в гибридном исполнении электронный магнитный компас, используемый в автомобильном навигационном комплексе. Прибор содержит все необходимые элементы для выдачи цифровой информации о всех трех составляющих магнитного поля Земли.

Фирмой Honeywell предлагается целая серия магнитоэлектронных устройств (HMC1001, HMC1002, HMC2003 и HMR) для навигационных приборов и высокочувствительных магнитометров. Устройства также могут выдавать информацию об одной, – двух – или трех – составляющих магнитного поля Земли. Приборы выпускаются в гибридном исполнении.

Аналогичные по назначению, но еще более сложные устройства (TCM2, AX100, Vector-2X, Wayfinder-VR и др.), выпускаются фирмой Precision Navigation Inc. (США).

Судя по многочисленным публикациям в зарубежных и отечественных источниках, дальнейшее развитие функциональных магнитоэлектронных устройств идет по пути их промышленного освоения с внедрением новых технологий, расширения номенклатуры, функций и сфер применения.

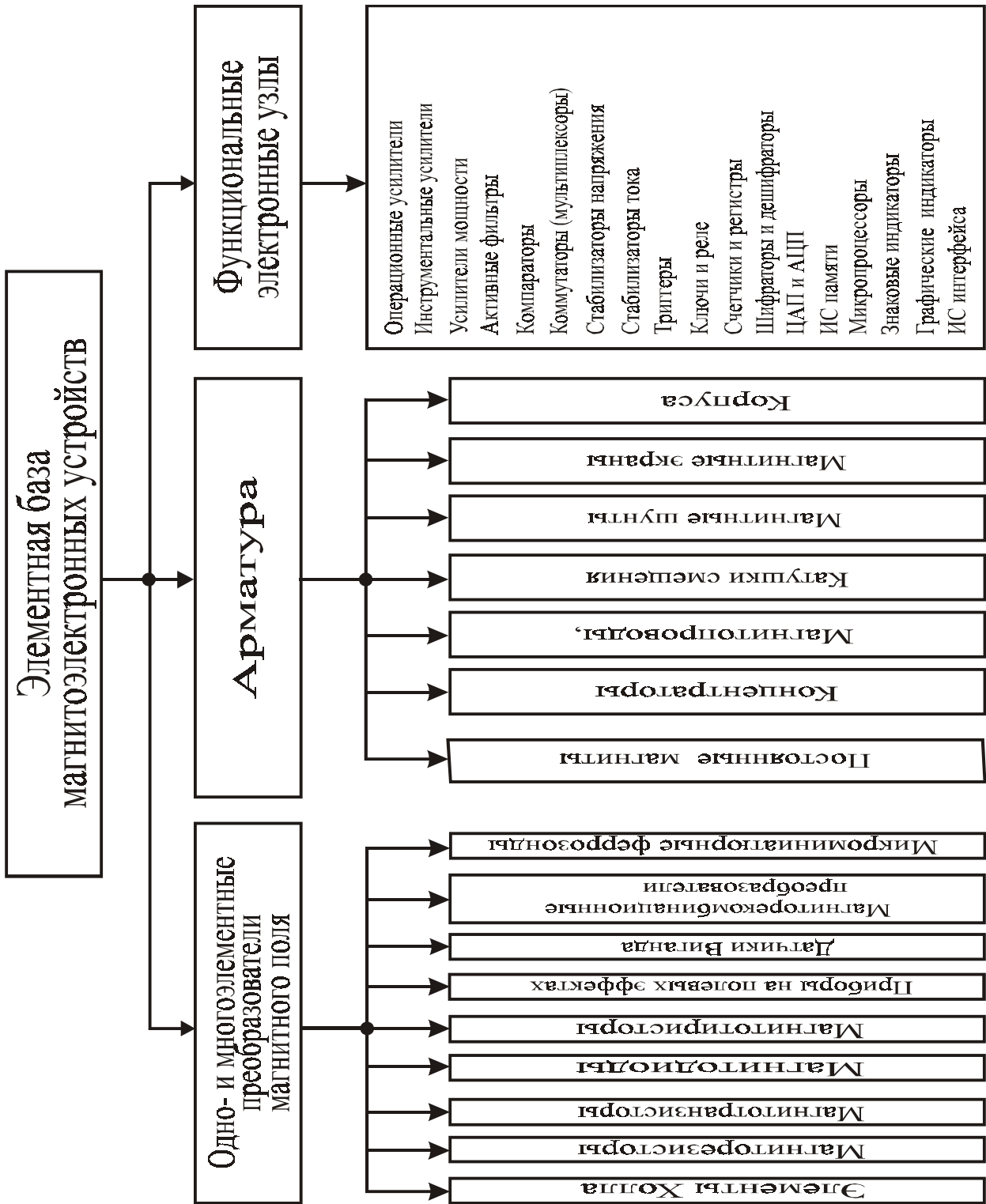


Рис. 1.3. Элементная база микромагнитоэлектроники

Примером такого развития могут служить интегральные полупроводниковые сенсоры.

Интегральные полупроводниковые сенсоры (ИПС) представляют собой один из классов твердотельных датчиков, чья основная особенность – конструктивно-технологическая и функциональная интеграция различных элементов измерительного канала на одном чипе с использованием микро- и нанотехнологий [14].

Конкретными примерами таких сенсоров могут служить магнитоуправляемая интегральная микросхема типа AD22151, выпускаемая американской фирмой Analog Devices, и ориентационный датчик типа EMF-01 (фирма Xensor Integration bv).

В настоящее время ежегодные расходы в мире на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в области создания ИПС составляют более 10 млрд. долларов; в то время как на разработки других типов выделяется около 1,5 млрд. долларов.

Объем продаж ИПС с каждым годом увеличивается: в 1990 г. он составлял 5,7 млрд. долларов, в 1995 г. – 10,2 млрд., а в 1997 г. – 14,6 млрд. долларов.

В США, Японии и в странах Западной Европы в последнее десятилетие наблюдается резкое увеличение доли ИПС в общем объеме продаж датчиков, составляющей сегодня около 35%.

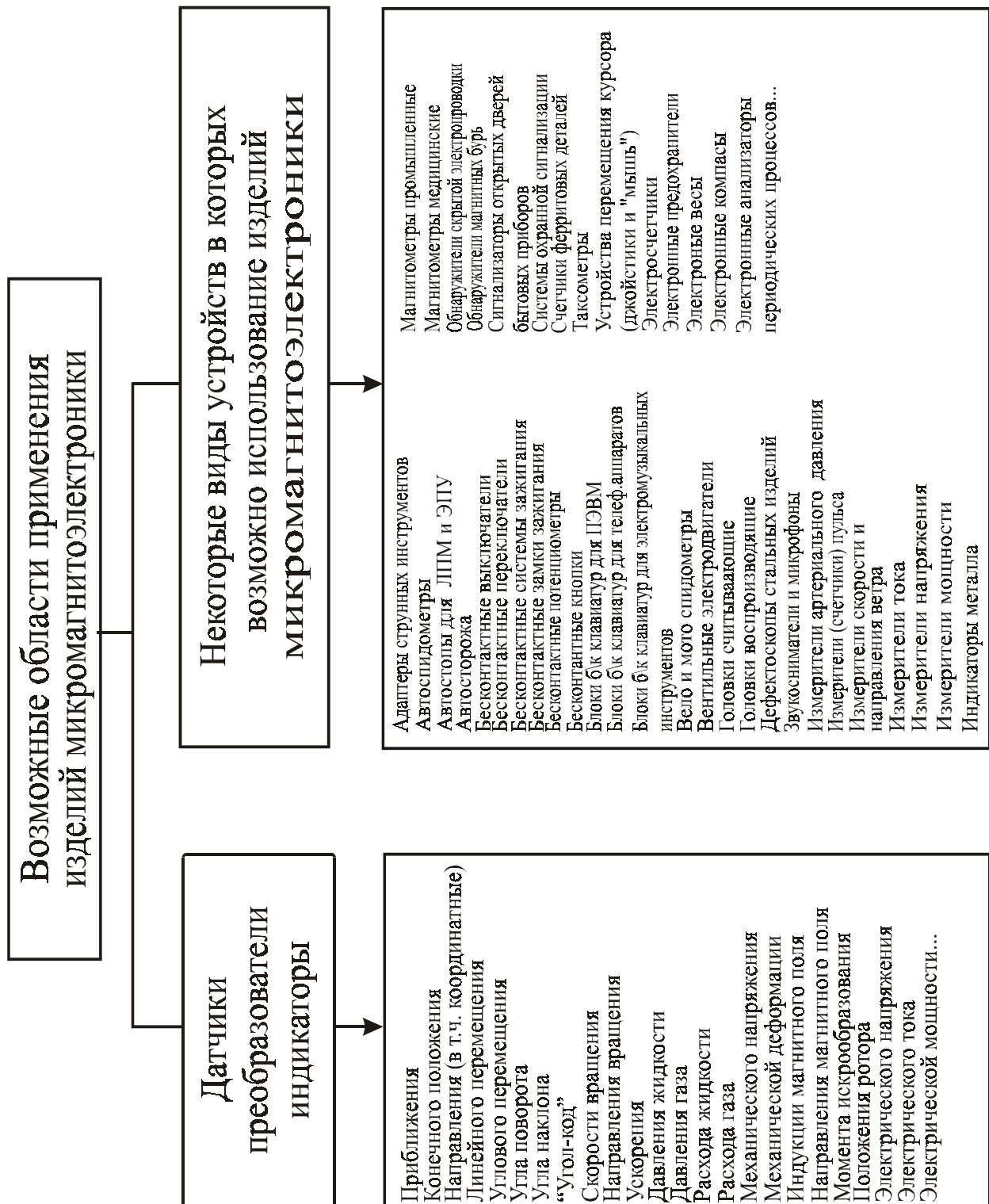
На мировом рынке магнитные интегральные полупроводниковые сенсоры занимают второе место после фоточувствительных ИПС. Примерно 30% магнитофоточувствительных ИПС используются в робототехнике (в стационарных и мобильных роботах).

Постоянные магниты. (ПМ). Постоянные магниты входят в состав большинства изделий микромагнитоэлектроники. Во многих случаях такие параметры ПМ, как: габариты, точность, стабильность, рабочий температурный диапазон и стоимость, – определяют параметры всего изделия микромагнитоэлектроники.

Производство постоянных магнитов является достаточно сложной задачей и требует использования современных материалов, технологий и оборудования

Зарубежные производители датчиков используют продукцию более чем 50-и специализированных фирм. Объем выпуска этих ПМ эквивалентен объему выпуска магнитных датчиков.

В последующих главах будут рассмотрены принципы функционирования, основные параметры и особенности применения большинства известных изделий микромагнитоэлектроники



Список литературы к главе 1

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. Справочные материалы. - М.: Машиностроение, 1965. - 928 с.
2. Аксененко М.Д., Бараночников М.Л., Смолин О.В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. -М.: Энергоиздат, 1984-208 с.
3. Афанасьев Ю.В. и др. Средства измерения параметров магнитного поля. –Л: Энергия, 1979. –320 с.
4. Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. Гальваномагнитные приборы. – М.: Радио и связь, 1983. - 104 с.
5. Егiazарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение. -М. : Радио и связь, 1987. -88 с.
6. Егiazарян Г.А., Манвелян Ю.С., Мнацакян Г.А., Саркисян А.С. Магнитодиод КД304 – простейшая функциональная схема // Электронная промышленность. 1980. -Вып.1 –с. 42-44
7. Егiazарян Г.А., Мнацакян Г.А., Саркисян А.С. Некоторые свойства кремниевых магнитодиодов // Известия АН АрмССР. Физика.-1981. Т.16. -с. 222-225
8. Егiazарян Г.А., Саркисян А.С. Температурная зависимость кремниевых планарных магнитодиодов. // Известия АН АрмССР. Физика.-1982.-Т.17.- с .277-281
9. Зайцев Ю.В., Марченко А.Н., Ващенко В.И. Полупроводниковые резисторы в электротехнике. -М. Энергоиздат, 1988, - 136 с.
10. Карпенко С.Х., Раков Б.М. Вопросы экранирования, расчета и применения тонкопленочных магнитных элементов. //Зарубежная радиоэлектроника, 1977, № 10, с.39-56.
11. Марченко А.Н., Свечников С.В., Смовж А.К. Полупроводниковые сенсорные потенциометрические элементы. -М. Радио и связь,1988.-192 с.
12. Мирзабаев М.М., Потаенко К.Д. и др. Эпитаксиальные датчики Холла и их применение. Ташкент. ФАН Уз.ССР, 1986 , -214 с.
13. Нефёдов А.В. Зарубежные аналоговые микросхемы и их аналоги. Справочник. Справочник. Том 4. Радио Софт. 2000, с.232-254
14. Подлепецкий Б. Интегральные полупроводниковые сенсоры: состояние и перспективы разработок. //CHIP NEWS, 1998, №5, с. 38-45.
15. Стафеев В.И., Каракушан Э.И. Магнитодиоды. –М.: Наука, 1975. -216 с.
16. Хомерики О.К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. -М.: Энергоиздат, 1986. -136 с.

Глава 2. Преобразователи магнитного поля

Преобразователь магнитного поля (ПМП) является основным элементом любого изделия микромагнитноэлектроники. ПМП преобразует магнитный поток в электрический сигнал.

Преобразователь магнитного поля представляет собой магниточувствительный элемент (МЧЭ), размещенный на подложке-держателе и снабженный выводами, необходимыми для соединения с электронной схемой усиления и обработки сигнала (рис. 2.1).

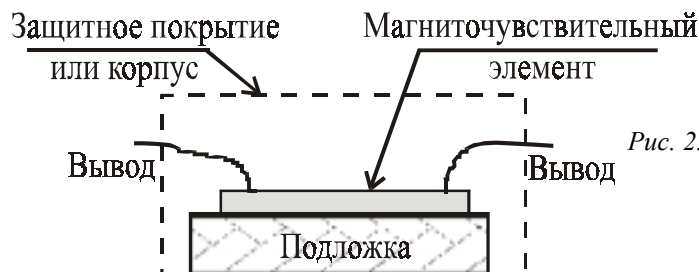


Рис. 2.1. Конструкция простейшего преобразователя магнитного поля

«МЧЭ является частью изделия, осуществляющей функцию восприятия контролируемых параметров среды или объекта и адекватного преобразования их значений в значения собственных электрических параметров».

[3] Магниточувствительный элемент изготавливается из материала, изменяющего свои свойства при воздействии внешнего магнитного поля.

При создании магниточувствительных элементов используются различные физические явления, происходящие в полупроводниках и металлах при взаимодействии их с магнитным полем (МП).

Наиболее известны МЧЭ, использующие эффекты Холла и Гаусса, магнитосопротивления, эффект Суля, а также магнитодиодный и магнитогальванорекомбинационный эффекты и др. [15, 24, 67].

Наибольшим спросом пользуются МЧЭ, реализованные в виде элементов Холла, магниторезисторов, магнитодиодов и магнитотранзисторов.

Каждый из перечисленных магниточувствительных элементов имеет определенный набор параметров и характеристик, преимуществ и особенностей, которые должны учитываться при проектировании, как преобразователей магнитного поля, так и аппаратуры.

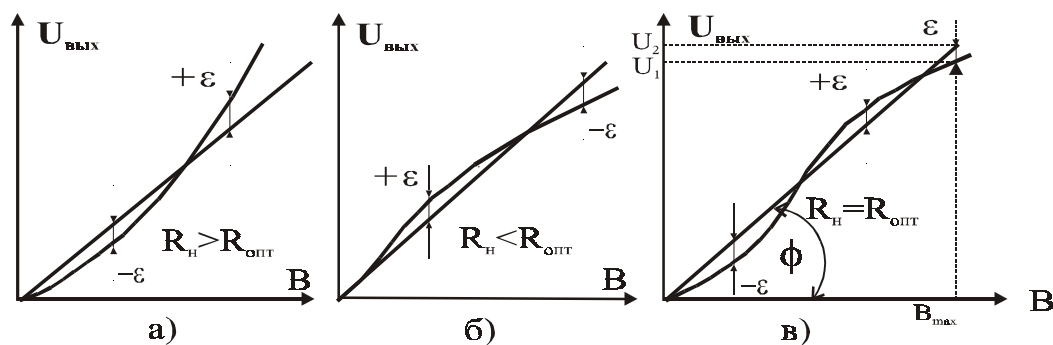


Рис. 2.2. Выходная характеристика преобразователя магнитного поля

Основным критерием, характеризующим преобразователь магнитного поля, является его выходная характеристика, определяющая зависимость выходного сигнала ПМП от величины индукции воздействующего магнитного поля.

Коэффициент нелинейности преобразования ПМП определяют графическим путем, для чего используют характеристику, приведенную на рис. 2.2.

Через начало координат выходной характеристики проводят прямую, таким образом, чтобы максимальное отклонение (ε) над прямой и под ней, по возможности, было одинаковым (рис. 2.2в). Например, для элементов Холла это соответствует использованию оптимального сопротивления нагрузки, когда $R_H = R_{\text{опт}}$. При этом максимальное отклонение определяется по следующей формуле:

$$\varepsilon = \Delta U_{\text{ВЫХ}} = U_1 - U_2$$

Коэффициент нелинейности ΔF характеристики определяется по выходной характеристике чувствительности (рис. 2.2):

$$\Delta = (\varepsilon / U_{\text{ВЫХ. МАКС}}) \times 100\% \quad (2.1)$$

где $U_{\text{ВЫХ. МАКС}}$ — напряжение на выходе ПМП при $B = B_{\text{макс}}$.

По характеристике, приведенной на рис. 2.2, определяют диапазон индукций магнитного поля, в котором характеристика преобразователя линейна. Этот диапазон лежит в пределах от $-B_{\text{макс}}$ до $B_{\text{макс}}$. Величина динамического диапазона D_B рассчитывается по формуле (2.2):

$$D_B = B_{\text{макс}} / B_{\text{мин}}. \quad (2.2)$$

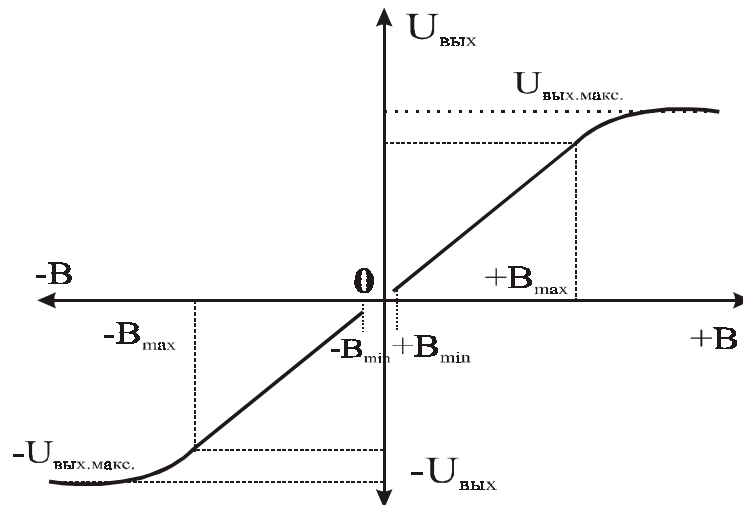


Рис. 2.3. К определению динамического диапазона преобразователя магнитного поля

Минимальный порог чувствительности преобразователя регламентируется, так называемой «мертвой зоной», расположенной в диапазоне от $-B_{\text{мин}}$ до $B_{\text{мин}}$.

Эта зона для различных типов преобразователей магнитного поля регламентируется различными их параметрами и характеристиками. Например, для элемента Холла «мертвая зона» регламентируется величиной его остаточного напряжения ($U_{\text{ост}}$) и уровнем его собственных шумов.

На рис. 2.4 приведены наиболее распространенные типы преобразователей магнитного поля, используемые в изделиях микромагнитоэлектроники.

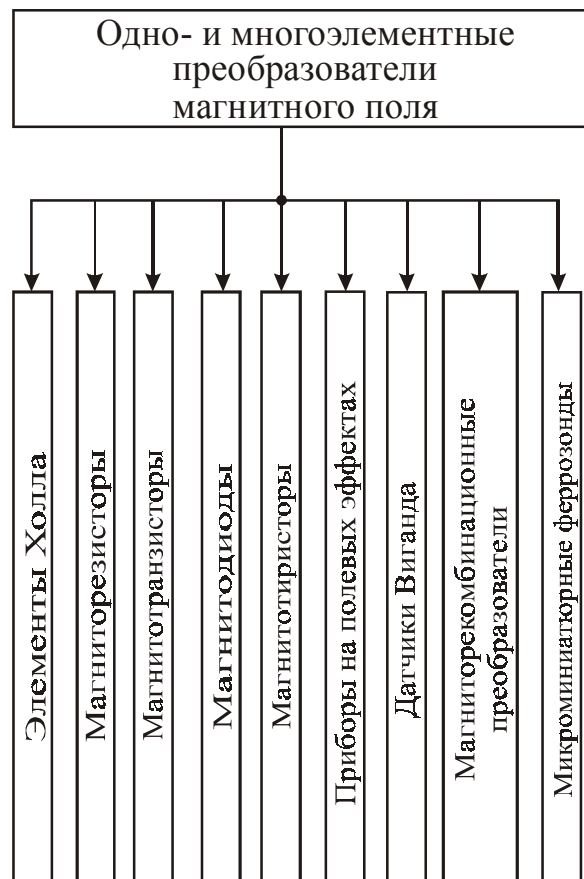


Рис. 2.4. Наиболее распространенные типы преобразователей магнитного поля, используемые в изделиях микромагнитоэлектроники

Таблица 2.1. Определения основных параметров и терминов, общих для преобразователей магнитного поля

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение (альтернативное обозначение)	Единица измерения	Определение
Номинальное напряжение питания	$U_{п-}$ ($U_{п.ном}$) U_{cc}	В	Постоянное напряжение, приложенное к входным выводам преобразователя при котором обеспечиваются его номинальные параметры при длительной работе.
Номинальное значение тока управления	$I_{уп.ном}$ ($I_{I.ном}$) (I_{IN}) (I_{UP})	мА	Значение тока управления, протекающего через преобразователь при номинальном напряжении питания. Это такое значение тока, протекание которого через магниточувствительный элемент, расположенный в среде неподвижного воздуха, не вызывает его нагрева выше чем на 10...15 °С температуры окружающей среды.
Максимальное значение тока управления	$I_{уп.макс}$ ($I_{I.макс}$) (I_I)	мА	Максимальный ток управления при котором возможна длительная работа преобразователя. Максимально допустимое значение тока управления в значительной степени определяется условиями эксплуатации ПМП, т.е. условиями теплоотвода и температурой окружающей среды, а также максимально допустимой температурой нагрева магниточувствительного элемента.
Максимальная электрическая мощность, рассеиваемая преобразователем.	$P_{макс}$ (P_{tot})	мВт (Вт)	Мощность при которой отклонение параметров преобразователя от номинальных значений не превышает установленных пределов при длительной работе.
Номинальное значение индукции управляющего магнитного поля.	$B_{ном(B)}$	мТл (Тл)	Предельное значение индукции управляющего магнитного поля при котором гарантируется заданная линейность преобразования.
Магнитная чувствительность преобразователя магнитного поля по току.	γ_I (K_{BO})	В/Тл (мВ/мТл)	Отношение выходного тока сигнала преобразователя к значению номинальной индукции: $\gamma I = I_{вых}/B_{ном}$
Магнитная чувствительность преобразователя магнитного поля по напряжению.	γ_u (S_U) (K_{BO})	В/Тл (мВ/мТл)	Отношение напряжения выходного сигнала преобразователя к значению номинальной индукции: $\gamma_u = U_{вых}/B_{ном}$
Относительная магнитная чувствительность преобразователя магнитного поля по току.	γ_{I0} (S_I) (S_{I0}) (S) (S_B)	% / Тл	Определяется по формуле: $\gamma_{I0} = [(I/I_0) \times (I_{вых}/B)] \times 100$ где I_0 – ток через ПМП при $B=0$; $I_{вых} = \Delta I = I_B - I_0$, I_B – ток через преобразователь при $B=B_{ном}$
Температурный коэффициент магнитной чувствительности	TK_{γ} (TC_{V20})	%/град	Коэффициент, определяемый как: $TK_{\gamma} = (100/\gamma_{T0}) \times (\Delta\gamma/\Delta T)$ Где γ_{T0} магнитная чувствительность при нормальной (комнатной) температуре, $\Delta\gamma$ - изменение чувствительности, ΔT – изменение температуры.
Удельная магнитная чувствительность преобразователя магнитного поля.	$\gamma_{уд}$ ($\gamma_{(20)}$)	В/Тл * А	Отношение магнитной чувствительности γ к значению номинального управляющего тока $\gamma_{уд} = \gamma / (I_{ном} * B_{ном})$
Максимальное значение индукции управляющего магнитного поля (Динамический диапазон по индукции)	$B_{макс}$	Тл (мТл)	Максимальное значение индукции управляющего магнитного поля при котором нелинейность преобразования не превышает установленной в паспорте нормы. Определяется графическим путем по энергетической характеристике чувствительности ПМП, как $U_{вых} = F(B)$.
Минимальное значение индукции управляющего магнитного поля.	$B_{мин}$	Тл (мТл) (Кгс) (гс)	Минимальное значение индукции магнитного поля регламентируется требованиями технической документации на ПМП или определяется по формулам: $B_{мин} = 2U_0 / \gamma_u$ $B_{мин} = 2I_0 / \gamma_I$ Где, U_0 - напряжение на выходе ПМП при $B = 0$; I_0 - ток на выходе ПМП при $B=0$; γ_u и γ_I магнитная чувствительность по току или напряжению соответственно.
Предельная рабочая частота	$f_{макс}$ (F_{max})	Гц (кГц) (МГц)	Предельная частота синусоидально модулированного магнитного потока, при котором чувствительность ПМП падает до значения 0,707 от чувствительности при немодулированном потоке.

Таблица 2.1. Определения основных параметров и терминов, общих для преобразователей магнитного поля (продолжение)

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение (альтернативное обозначение)	Единица измерения	Определение
Предельный интервал индукций управляющего магнитного поля	$B_{\text{макс}}$ (B_{max})	Тл (кГс) мТл (Гс)	Максимальное значение индукции магнитного поля при котором нелинейность преобразования не превышает установленной в паспорте нормы. Определяется графическим путем по энергетической характеристике ПМП в рабочем диапазоне индукций управляющего магнитного поля от $-B_{\text{макс}}$ до $+B_{\text{макс}}$.
Порог чувствительности	$B_{\text{п}}$	Тл	Среднее квадратическое значение первой гармоники действующего на МЧЭ модулированного магнитного потока, при котором среднее квадратическое значение первой гармоники напряжения (тока) сигнала МЧЭ равно среднему квадратическому значению напряжения (тока) шума в заданной полосе на частоте модуляции потока
Обнаружительная способность	D	Тл^{-1}	Величина, обратная порогу чувствительности $B_{\text{п}}$: $D = 1 / B_{\text{п}}$
Порог чувствительности в единичной полосе пропускания	$B_{\text{п1}}$	$\text{Тл} \times \text{Гц}^{-1/2}$	Порог чувствительности преобразователя магнитного поля, приведенный к единичной полосе частот усилителя сигнала МЧЭ. Порог чувствительности определяет минимальный уровень магнитного излучения, регистрируемый преобразователем магнитного поля при отношении сигнал/шум, равном единице. $B_{\text{п1}} = B_{\text{п}} / \Delta f$
Нелинейность характеристики преобразования	ΔF ($F_{\text{ЛН}}$) (L)	%	Нелинейность ΔF характеристики определяется из выражения по энергетической характеристике чувствительности, как : $\Delta F = (\epsilon / U_{\text{вых. макс}}) \times 100$ где $U_{\text{вых. макс}}$ напряжение на выходе ПМП при $B = B_{\text{макс}}$. ϵ - отклонение $U_{\text{вых}}$ от условной прямой определяемой, как $U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}}$
Интервал рабочих температур	$T_{\text{раб}}$ ($T_{\text{А}}$)	$^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{K}$)	Интервал рабочих температур окружающей среды, при котором гарантируются параметры преобразователя.
Предельная температура	$T_{\text{пред}}$ ($T_{\text{стg}}$)	$^{\circ}\text{C}$ ($^{\circ}\text{K}$)	Температура при которой не наступает отказ преобразователя, но не гарантируются основные параметры прибора.
Тепловое сопротивление конструкции преобразователя	λ (G_{th})	$\text{Вт} / ^{\circ}\text{C}$ ($\text{Вт} / ^{\circ}\text{K}$)	Показатель, который характеризует конструкцию ПМП и определяется по формуле: $\lambda = P_{\text{макс}} / (T_{\text{макс}} - T_{\text{А}})$ Где $T_{\text{макс}}$, $T_{\text{А}}$ - предельная и рабочая температура преобразователя; $P_{\text{макс}}$ - максимально допустимая мощность, рассеиваемая преобразователем.

Примечание. При разработке высокочувствительной аппаратуры для регистрации магнитных полей наиболее существенными являются пороговые характеристики МЧЭ. В настоящее время практически не существует стандартных терминов, определяющих пороговые характеристики. Однако, по аналогии с другими приборами, регистрирующими электромагнитные излучения, например, в оптическом диапазоне, в табл. 2.1 приведены возможные варианты [5, 24, 51, 53, 67, 70].

В зависимости от режимов работы ПМП, согласно О. К. Хомерики. [67], магнитоэлектронные устройства можно условно разделить на три группы.

Назначением ПМП первой группы является индикация магнитной индукции.

Функция преобразования может быть нелинейной, однако чувствительность ПМП к магнитному полю должна быть по возможности более высокой. В данной группе устройств используются элементы Холла, магниторезисторы, магнитодиоды, ГМР преобразователи и магнитотранзисторы, причем нельзя однозначно сказать, что какой-либо из этих преобразователей более предпочтителен. Вопрос выбора конкретного вида преобразователя решается на основании сопоставления функционального назначения магнитоэлектронного устройства, а также конструктивных, технологических, экономических и других. соображений.

К первой группе магнитоэлектронных устройств относятся: бесконтактные реле; индикаторы положения перемещающихся объектов; бесконтактные клавиши для ручного ввода информации; преобразователи угла поворота типа «угол–код»; бесколлекторные двигатели постоянного тока; считывающие элементы в твердотельных запоминающих, переключающих и логических устройствах, использующих цилиндрические магнитные домены, бесконтактные коммутаторы и др.

Ко второй группе относятся магнитоэлектронные устройства, в которых преобразователи магнитного поля служат для измерения магнитной индукции, действующей на них. В этом случае выходной сигнал ПМП должен быть прямо пропорционален значению магнитной индукции. Последнее требует линейности функции преобразования. Исходя из свойств ПМП, наиболее предпочтительным для этой группы является использование элементов Холла, а также магниторезисторов и ГМР преобразователей.

К этой группе магнитоэлектронных устройств относятся измерители напряженности магнитных полей; измерители электрических токов и напряжений; измерители очень малых перемещений; устройства для магнитодефектоскопии; воспроизводящие магнитофонные головки; головки для считывания информации, записанной на магнитных носителях, и др.

К третьей группе относятся устройства, в которых используется свойство ПМП служить аналоговым перемножителем двух подаваемых на его вход электрических сигналов.

Перемножительные свойства ПМП эффективно используются при построении аналоговых математических блоков, реализующих помимо операции перемножения двух величин также операции возведения в степень, извлечения корня, деления.

К этой же группе относятся измерители электрической мощности и энергии; измерители механической мощности; измерители электромагнитной мощности электрических машин; смесители и преобразователи частот; анализаторы периодических и случайных процессов и др. [67].

2.1. Элементы Холла

Элементы Холла, часто называемые «датчиками Холла», являются самыми распространенными преобразователями магнитного поля.

Действие этих элементов основано на эффекте Холла, который заключается в «возникновении поперечной разности потенциалов при прохождении электрического тока в поперечном ему магнитном поле».

Элемент Холла представляет собой пластину из полупроводникового материала толщиной d , по четырем сторонам которой расположены контакты. Контакты 1 и 2 называются *токовыми*, а контакты 3, и 4 *выходными* или *измерительными* (иногда эти контакты называют *холловскими*) – см. рис. 2.5.

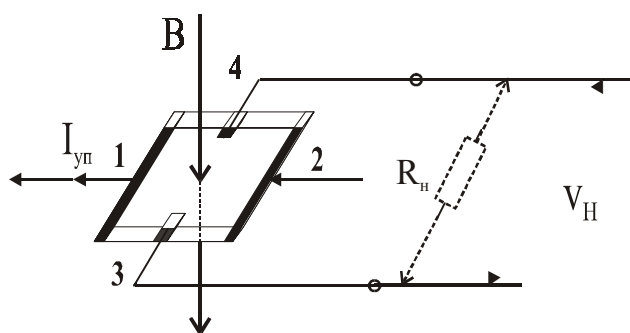


Рис. 2.5. К пояснению принципа работы элемента Холла

Принцип действия элемента Холла объясняется следующим образом.

Через контакты 1 и 2 пропускают управляющий ток $I_{уп}$, а с контактов 3 и 4 снимают напряжение Холла (V_H).

В общем виде выражение для напряжения Холла (V_H) должно быть записано, как

$$V_H = (R_H / d) \times (I_{уп} \times B), \text{ В/А} \times \text{Тл} \quad (2.3)$$

где R_H – постоянная Холла (коэффициент Холла);

d – толщина элемента;

$I_{уп}$ – ток управления;

B – индукция действующего магнитного поля.

Постоянная Холла определяется, значением

$$R_{H_p} = 1 / qp \quad (2.4)$$

или

$$R_{H_n} = 1 / qn \quad (2.5)$$

где R_{H_p} – постоянная Холла для дырок;

R_{H_n} – постоянная Холла для электронов;

q – заряд электрона;

p – концентрация дырок;

n – концентрация электронов.

Определения специфических параметров и термины, используемых при описании работы элементов Холла, приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2. Термины и определения основных параметров элементов Холла

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение (альтернативное обозначение)	Единица измерения	Определение
Входное сопротивление элемента Холла	$R_{вх}$ (R_{10})	Ом	Сопротивление между управляющими электродами элемента Холла, измеренное при разомкнутых холловских электродах и отсутствии магнитного поля. ($B=0$)
Выходное сопротивление элемента Холла	$R_{вых}$ (R_{20})	Ом	Сопротивление между холловскими электродами элемента при разомкнутой входной цепи и при отсутствии магнитного поля. ($B=0$).
Остаточное напряжение	$U_{ост}$ (U_0) (V_{R0})	В (мВ)	Напряжение на выходных электродах, возникающее при протекании тока управления и при отсутствии магнитного поля ($B=0$) и R_H - стремящимся к бесконечности.
Остаточное напряжение, приведенное к значению тока управления	R_0	В/А	Для оценки элемента Холла с точки зрения мешающего действия $U_{ост}$ пользуются показателем (R_0), т.е. отношением остаточного напряжения к номинальному значению тока управления $R_0 = U_{ост} / I_{ном}$
Температурный коэффициент входного сопротивления	$TK_{R_{вх}}$ (TC_{R10})	% / град.	Коэффициент, определяемый как: $TK_{R_{вх}} = (100 \times \Delta R_{вх}) / (R_{вх}(T_0) \times \Delta T)$ Где $\Delta R_{вх}$ - изменение входного сопротивления элемента; ΔT - изменение температуры
Температурный коэффициент выходного сопротивления	$TK_{R_{вых}}$ (TC_{R20})	% / град.	Коэффициент, определяемый как $TK_{R_{вых}} = (100 \times \Delta R_{вых}) / (R_{вых}(T_0) \times \Delta T)$ Где $\Delta R_{вых}$ - изменение выходного сопротивления элемента, ΔT - изменение температуры.
Сопротивление линеаризации	R_L	Ом	Сопротивление нагрузки элемента Холла при котором погрешность спрямления (нелинейность) минимальна. Значение R_L может быть определено расчетным путем или экспериментально, путем последовательного снятия энергетических характеристик.
Индукционное остаточное напряжение	U_L (A_L)	В (мВ) (см ²)	Это напряжение, индуцируемое переменным магнитным потоком управления в витке, образованном выводами и самим элементом Холла. Значение этого напряжения зависит от значения индукции магнитного поля, её частоты и площади контура AL , в котором оно наводится. $U_L = A_L (dB/dt)$

Основные параметры элементов Холла зависят от температуры. Эти зависимости имеют сложное физическое объяснение [67] и в наиболее простом виде могут быть проиллюстрированы двумя основными факторами: температурной зависимостью ЭДС - Холла (V_H) и температурной зависимостью сопротивления (R) материала, из которого изготовлен МЧЭ. (см. рис. 2.6 и 2.7).

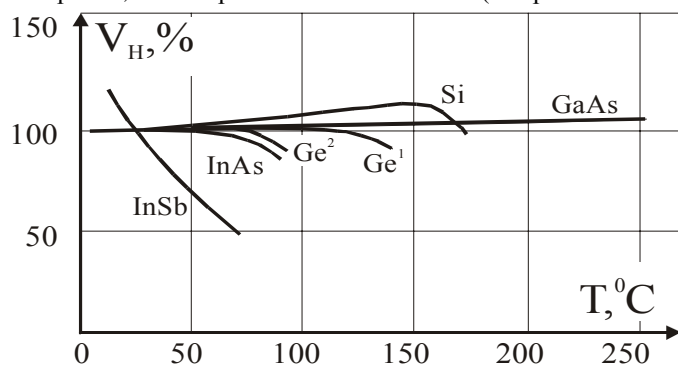
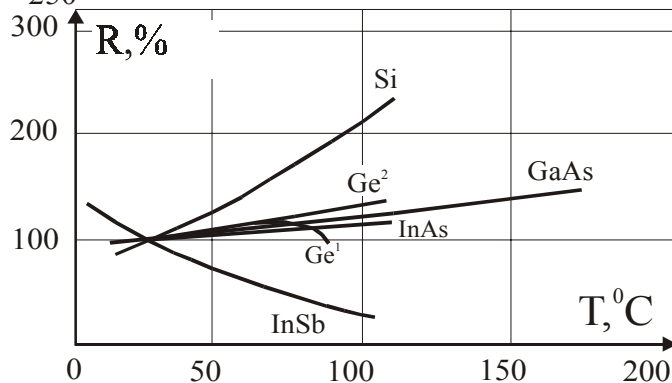


Рис. 2.6. Температурная зависимость ЭДС - Холла для различных полупроводниковых материалов

Рис. 2.7. Температурная зависимость сопротивления для различных полупроводниковых материалов



Магнитная чувствительность элемента Холла является функцией угла α между вектором напряженности электрического и магнитного полей:

$$\gamma_{\alpha} = \gamma_B \times B \times \sin \alpha \quad (2.6)$$

Магнитная чувствительность элемента Холла достигает максимума при угле α , равном 90° . При использовании концентраторов и других элементов магнитных систем зависимость (2.4) может быть иной.

Линейность элемента Холла определяется по характеристике, приведенной на рис. 2.2.

Более подробно с физикой работы элементов Холла можно ознакомиться в [5, 15, 24, 36, 44, 67].

Для изготовления МЧЭ элементов Холла наиболее широко используются: кремний (Si), германий (Ge), арсенид индия (InAs), антимонид индия (InSb), арсенид галлия (GaAs), то есть полупроводниковые материалы, обладающие высокой подвижностью носителей заряда и наивысшим значением коэффициента Холла.

Известно также применение для этих целей пластин и тонких пленок из селенистой ртути (HgSe) и теллуристой ртути (HgTe), а также висмута (Bi) [3].

В последние годы некоторые фирмы ведут работы по использованию тройных соединений типа «кадмий–ртуть–теллур» ($\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$). Элементы Холла на основе указанных соединений работают в интервале от комнатных до гелиевых температур [24].

Конструктивное оформление элемента Холла зависит от используемого исходного полупроводникового материала и от технологии изготовления.

Магниточувствительный элемент преобразователя Холла может быть изготовлен с использованием любой современной технологии микроэлектроники: полупроводниковой биполярной и эпитланарной, пленочной, МОП, КНС, КНИ и др. Наибольшее распространение получили *кристаллические* и *пленочные* МЧЭ.

На рис. 2.8 рассмотрены классические варианты топологии элементов Холла.

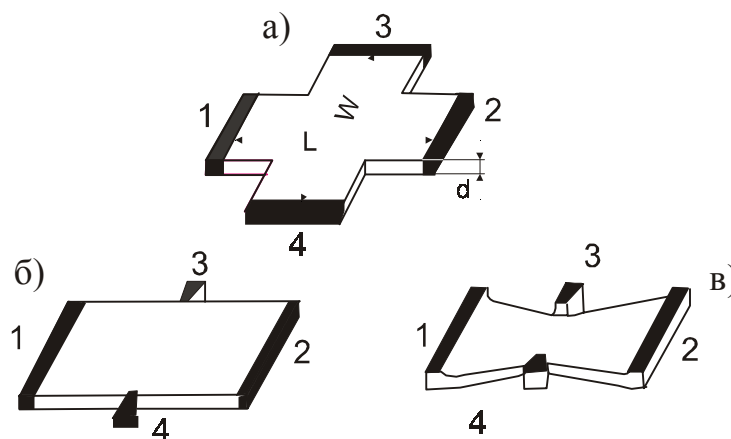


Рис. 2.8. Классическая топология дискретных «кристаллических» чувствительных элементов: а – «крест»; б – «прямоугольник»; в – «бабочка»

Каждая из топологий МЧЭ, приведенных на рис. 2.8, обладает своими особенностями и применяется с учетом решения конкретных технических задач.

Конструктивно преобразователи Холла могут быть выполнены как в виде дискретных элементов, так и в виде полупроводниковых структур, расположенных в кристалле полупроводникового материала, в том числе и вместе с электронной схемой усиления и обработки сигнала ЭХ.

Конструкция ЭХ в значительной степени предопределяется областью их возможного применения. Не существует единой универсальной конструкции, приемлемой для всех случаев технического использования преобразователей.

Наибольшее распространение получили четыре вида конструкций, которые условно можно именовать бескорпусной, бескорпусной на подложке, бескорпусной на подложке с использованием концентратора магнитного поля и корпусной. Варианты конструктивного оформления элементов Холла приведены на рис. 2.9.

Бескорпусная (рис. 2.9а). Интегральный магниточувствительный элемент, сформированный непосредственно в кристалле полупроводникового материала, одновременно является подложкой (основанием) ЭХ. Тонкопленочные контактные площадки расположены на поверхности кристалла. Соединение МЧЭ с внешними устройствами осуществляется проволочными или шариковыми выводами. Такой элемент может размещаться в стандартном герметизированном корпусе ИС. В случае необходимости кристалл может предварительно герметизироваться слоем защитного лака или эпоксидного компаунда.

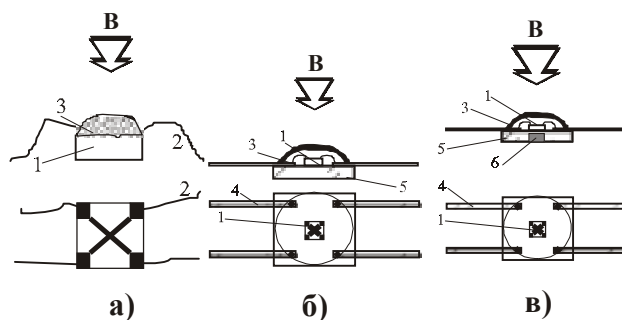


Рис. 2.9. Варианты бескорпусного исполнения элементов Холла: 1 – магниточувствительный элемент; 2 – проволоочный вывод; 3 – покрытие из эпоксидной смолы; 4 – балочный вывод; 5 – подложка из изолирующего материала; 6 – ферритовый концентратор

Бескорпусная на подложке (рис. 2.9.б). В этом случае МЧЭ размещается на специальной изолированной подложке. В качестве подложки обычно используются ситалл, керамика, стеклотекстолит или полиамидная пленка. На одной подложке могут размещаться два и более магниточувствительных элемента. Герметизация прибора осуществляется слоем защитного лака или эпоксидной смолы.

Бескорпусная на подложке с использованием концентраторов магнитного поля (рис. 2.9.в). От предыдущих вариантов (рис. 2.9.а,б) отличается тем, что может размещаться на подложке из ферромагнитного материала (феррита, пермаллоя и др.). В такой конструкции может быть использован миниатюрный концентратор магнитного поля, выполненный в виде круглого или прямоугольного столбика. В этом случае магнитная чувствительность МЧЭ повышается в 1,5–6 раз за счет концентрации управляющего магнитного поля на активную часть элемента.

Корпусная (рис. 2.10 и 2.11). Магниточувствительный элемент размещается в герметичном оригинальном (рис. 2.10) или стандартном (рис. 2.11) корпусе ИС. Для изготовления корпусов широко используются пластмасса, керамика и немагнитные металлы. В одном корпусе можно разместить несколько МЧЭ. В случае необходимости, в корпусе могут находиться пассивные концентраторы магнитного поля и миниатюрные постоянные магниты.

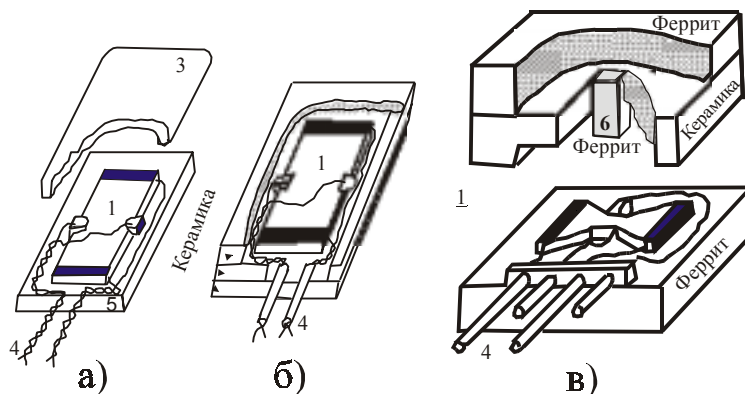


Рис. 2.10. Варианты размещения элементов Холла в оригинальных корпусах: а и б – в керамическом корпусе; в – с использованием концентратора магнитного поля; 1 – магниточувствительный элемент; 3 – крышка; 4 – вывод; 6 – концентратор

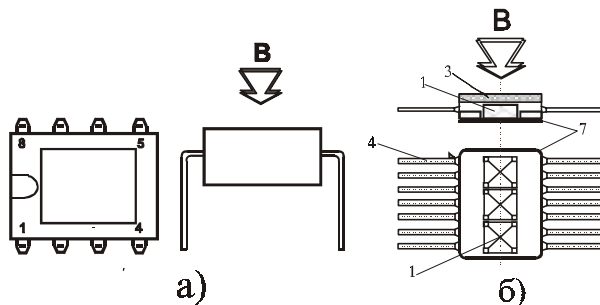


Рис. 2.11. Варианты размещения элементов Холла в стандартных корпусах ИС: а – пластмассовом DIP корпусе; б – в металлостеклянном корпусе

Конструкции ЭХ с ферромагнитными концентраторами не обеспечивают линейности характеристики преобразования. Поэтому они, как правило, не используются для измерительных целей, а являются основным элементом в устройствах индикации магнитной индукции.

В последние годы кристаллические элементы заменяются интегральными и тонкопленочными. Из новых разработок можно отметить следующие.

2.1.1. Элементы Холла по технологии биполярных ИС

Большинство интегральных элементов Холла изготавливаются по биполярной эпитаксиальной технологии. Эта технология хорошо освоена в электронной промышленности, так как она широко используется при изготовлении кремниевых интегральных микросхем. Поэтому для изготовления интегральных элементов Холла практически не требуется дополнительного технологического оборудования.

Существенным недостатком приборов, изготовленных по биполярной технологии, является значительный ток управления – 2–10 мА. Этот параметр особенно критичен при использовании приборов в устройствах с автономными источниками питания, а также в энергосберегающих системах.

Стоимость приборов, изготовленных по биполярной эпитаксиальной технологии, остается достаточно высокой, что обусловлено, главным образом, использованием дорогостоящих эпитаксиальных структур со скрытыми высоколегированными слоями [9, 20].

Учитывая широкое распространение интегральных элементов Холла, изготовленных по биполярной технологии, ниже приводится описание нескольких вариантов таких приборов.

Горизонтальный элемент Холла

Структура элемента Холла, изготавливаемого по типовой эппланарной технологии кремниевых интегральных микросхем, приведена на рис. 2.12. Элемент предназначен для регистрации магнитного потока, перпендикулярного к поверхности кристалла.

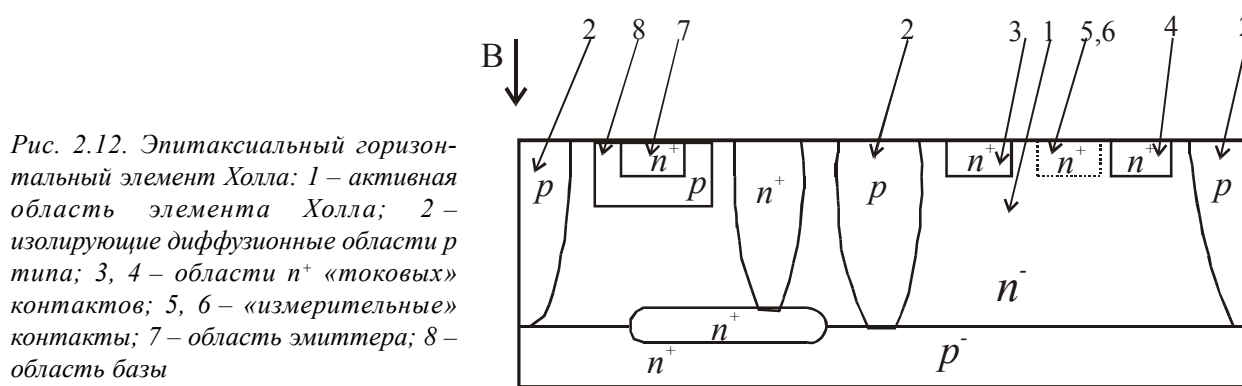


Рис. 2.12. Эпитаксиальный горизонтальный элемент Холла: 1 – активная область элемента Холла; 2 – изолирующие диффузионные области p-типа; 3, 4 – области n^+ «токовых» контактов; 5, 6 – «измерительные» контакты; 7 – область эмиттера; 8 – область базы

Геометрию активной области элемента Холла 1 определяют изолирующие диффузионные области p-типа 2, области n^+ «токовых» 3, 4 и «измерительных» (холловских) 5, 6 контактов формируются одновременно с изготовлением области эмиттера 7 биполярных транзисторов.

Структура эпитаксиального элемента Холла с четырьмя «измерительными» и «токовыми» контактами обеспечивает получение величины магнитной чувствительности порядка 0,43 В/Тл при токе управления 5 мА и остаточном напряжении не более 4 мВ [69].

Вертикальный элемент Холла

На рис. 2.13 приведена структура элемента Холла, чувствительного к составляющей магнитного поля, направленной параллельно поверхности кристалла. Этот элемент также изготовлен по типовой эпитаксиально-планарной технологии.

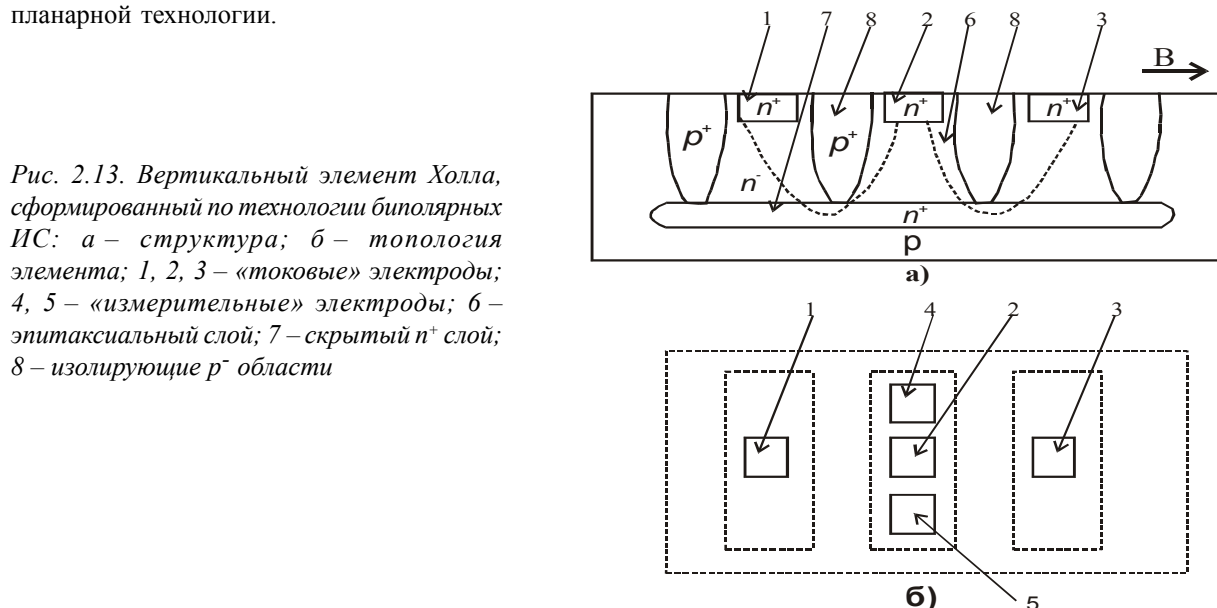


Рис. 2.13. Вертикальный элемент Холла, сформированный по технологии биполярных ИС: а – структура; б – топология элемента; 1, 2, 3 – «токовые» электроды; 4, 5 – «измерительные» электроды; 6 – эпитаксиальный слой; 7 – скрытый p^+ слой; 8 – изолирующие p^- области

Элемент имеет три «токовых» (1, 2, 3) и два «измерительных» (4, 5) электрода, расположенных в плоскости кристалла в ортогональных направлениях. Смещение задается таким образом, что ток течет от центрального токового контакта 2 к двум другим токовым контактам (1, 3) через эпитаксиальный слой 6 и скрытый n^+ слой 7. В эпитаксиальном слое под центральным токовым электродом 1 ток течет перпендикулярно поверхности кристалла. Если внешнее магнитное поле направлено параллельно оси расположения токовых электродов и поверхности кристалла, то в активной области элемента генерируется ЭДС -Холла, которая фиксируется на измерительных (холловских) электродах, расположенных около центрального токового электрода.

Удельная магнитная чувствительность такого элемента составляет примерно 47 В/ТлГА, и при дальнейшей оптимизации топологии кристалла может быть увеличена до 1000–1300 В/ТлГА [69].

Трехполюсный элемент Холла

Представляет интерес преобразователь магнитного поля, предложенный Ч. С. Румени, П. Т. Костевым. и названный авторами трехполюсным элементом Холла [63].

На самом деле данный преобразователь не является элементом Холла в классическом понимании. По принципу действия прибор относится к полупроводниковым магниторезисторам. Структура преобразователя магнитного поля приведена на рис. 2.14.

Преобразователь реализован в кремниевой подложке толщиной 300 мкм, на поверхности которой сформированы три омических контакта (H_1 , H_2 , H_3). Электроды (контакты) имеют прямоугольную форму и расположены на одинаковом расстоянии друг от друга. Напряжение питания прикладывается между электродом H_1 и электродами H_2 , H_3 (через резисторы R_6 , R_1 и R_2).

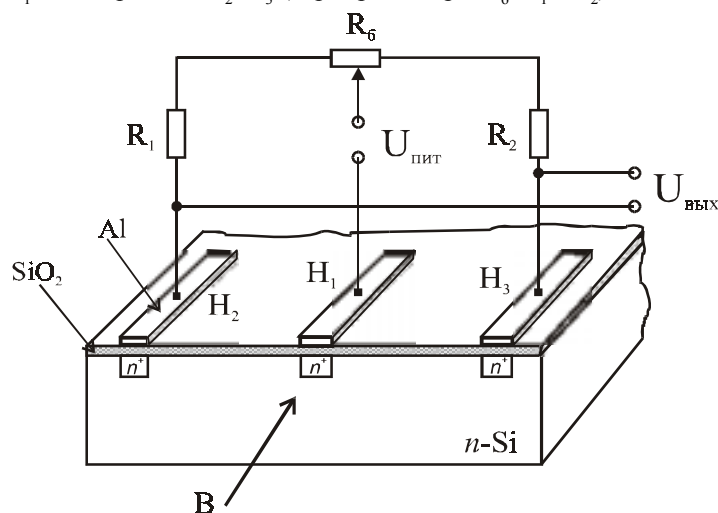


Рис. 2.14. Структура и схема включения «трехполюсного элемента Холла»

Прибор функционирует следующим образом. При воздействии магнитного потока, параллельного плоскости кристалла, напряжение сигнала возникает между крайними электродами, а дифференциальное напряжение $U_{\text{вых}}$ снимается непосредственно с электродов H_2 , H_3 .

При расстоянии между электродами $H_2 - H_1$ и $H_3 - H_1$, равном 300 мкм, и сопротивлении нагрузки, равном $R_1 = R_2 = 10$ кОм, магнитная чувствительность элемента достигает 0,1–0,12 В/Тл при токе управления 15 мА.

Напряжение сигнала $U_{\text{вых}}$ является линейной функцией магнитной индукции B и тока управления $I_{\text{уп}}$, при смене полярности магнитного поля этот сигнал также меняет свой знак.

При помощи резистора R_6 производится компенсация остаточного холловского напряжения $U_{\text{ост}}$ [63].

2.1.2. Элементы Холла по МОП технологии

В последние годы в России и за рубежом ведутся интенсивные работы по созданию и производству магниточувствительных элементов и структур на основе кремниевой МОП -технологии. Эта технология не требует применения дорогостоящих эпитаксиальных структур и позволяет значительно снизить ток управления элементов. Кроме того, по МОП -технологии можно создавать дешевые микромощные магниточувствительные и магнитоуправляемые ИС.

С учетом перспективности использования интегральных элементов Холла, изготовленных с применением МОП -технологии, ниже приводится описание нескольких вариантов таких приборов.

Горизонтальный МОП элемент Холла

Структура кристалла горизонтального МОП элемента Холла приведена на рис. 2.15. Исходной подложкой является кремниевая пластина n типа, на поверхности которой сформированы четыре диффузионные области p^+ типа проводимости, две из которых служат «токовыми» электродами 1, 2, а две другие – «измерительными» (холловскими) электродами 3, 4. Между областями сформирован подзатворный диэлектрик 5 и алюминиевый электрод затвора 6.

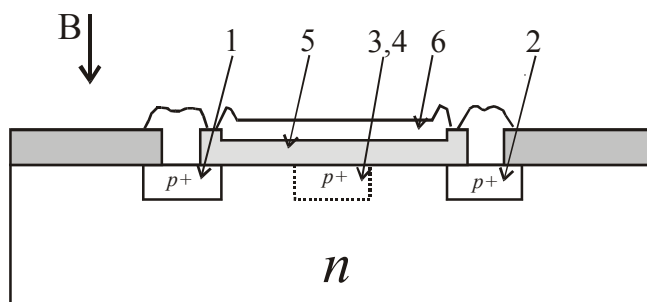


Рис. 2.15. Структура горизонтального МОП элемента Холла: 1, 2 – p^+ типа диффузионные области «токовых» контактов; 3, 4 – p^+ типа диффузионные области «измерительных» электродов; 5 – подзатворный диэлектрик; 6 – электрод затвора

Работает элемент Холла следующим образом. При подаче на затвор отрицательного относительно подложки напряжения в подзатворной области возникает инверсный слой. Если при этом подать смещение на токовые электроды, то между ними потечет ток дырок, а так как измерительные электроды выполнены симметрично относительно друг друга, то разность потенциалов между ними в отсутствие магнитного поля равна нулю. При воздействии внешнего магнитного поля, перпендикулярного к поверхности кристалла, в инверсном слое МОП структуры возникает поперечная холловская ЭДС, значение и знак которой определяются величиной и направлением вектора магнитной индукции.

Основными отличительными чертами данного элемента являются:

- - полная совместимость его формирования с типовыми МОП транзисторными структурами;
- - возможность получения очень тонкой активной области элемента Холла (10–20 нм), которая в данной конструкции определяется толщиной инверсионного слоя, что, в свою очередь, позволяет повысить удельную магнитную чувствительность элемента до 80 В/ТлГА.

При формировании подобной структуры на кремниевой подложке p типа проводимости удельная магнитная чувствительность может быть увеличена до 400 В/ ТлГА [69].

Вертикальный МОП элемент Холла

На рис. 2.16 приведена структура и топология «вертикального» элемента Холла, выполненного по МОП технологии кремниевых ИС.

Исходной подложкой является кремниевая пластина n типа. Активная область элемента ограничивается глубокой кольцевой областью p типа проводимости 7.

Поликремневый затвор располагается на тонком подзатворном окисле кремния, что позволяет при подаче на него смещения обеспечивать стабилизацию поверхностного потенциала и поверхностной плотности заряда.

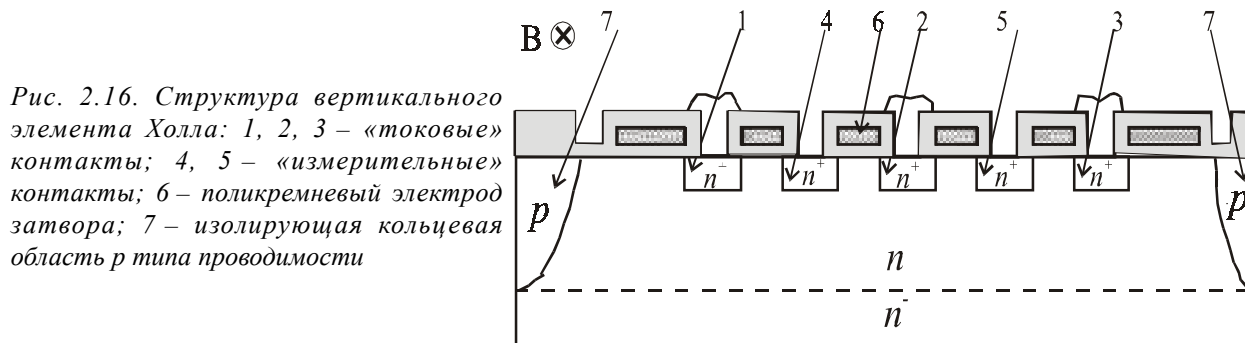


Рис. 2.16. Структура вертикального элемента Холла: 1, 2, 3 – «токовые» контакты; 4, 5 – «измерительные» контакты; 6 – поликремневый электрод затвора; 7 – изолирующая кольцевая область p типа проводимости

В данной структуре токовые и измерительные (холловские) контакты выполнены в виде параллельных полосок. В отсутствие магнитного поля ток распределяется равномерно между контактами 1-2 и 2-3, следовательно, значения потенциалов на измерительных контактах 4, 5 практически равны. При воздействии внешнего магнитного поля в активной области элемента возникает компенсирующее поле Холла, которое является мерой напряженности магнитного поля [69].

2.1.3. Элементы Холла по технологии молекулярной эпитаксии

В последние годы ведущими зарубежными фирмами ведутся интенсивные работы по созданию элементов Холла с использованием молекулярной эпитаксии (*Molecular beam epitaxy - MBE*).

В отечественной научно-технической литературе подобная технология носит название *молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ)*.

Элементы Холла, изготовленные по МБЕ технологии, представляют собой многослойные структуры, сформированные на полупроводниковой подложке. Например, на подложке из GaAs последовательно формируются слои: AlGaAsSb – InAs – AlGaAsSb – GaAsAl. [87]

Использование этой технологии позволяет создавать интегральные элементы Холла со сложной топологией магниточувствительных элементов, обладающих очень высокой магнитной чувствительностью. При этом топология магниточувствительного элемента и конструктивное оформление приборов могут быть самыми разнообразными.

Представляют интерес тонкопленочные элементы Холла, изготовленные японской фирмой Asahi с применением МВЕ -технологии. Приборы имеют весьма высокие магнитоэлектрические параметры. Они снабжены ферритовым концентратором, что увеличивает магнитную чувствительность в 2–6 раз.

Основные параметры опытных образцов элементов Холла, изготовленных фирмой Asahi с применением МВЕ, приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Основные параметры опытных образцов элементов Холла, изготовленных фирмой Asahi с применением МВЕ

Материал МЧЭ	Входное сопротивление при 20°C, $R_{вх}, \text{Ом}$	Ток управления $I_{уп}, \text{мА}$	Магнитная чувствительность, $\gamma, \text{В/Тл}$ при $B=50 \text{ мТл}$	Удельная магнитная чувствительность, $\gamma_{уд}, \text{В/Тл*А}$	Остаточное напряжение, приведенное к значению тока управления, $U_{ост}, \text{В/А}$
InSb	240...550	1,8...4,1	3...6,4	3000...6400	$\pm (1,7...3,9)$
InAs	400...700	8,6... 15	2...6	130...690	$\pm (1,1...1,7)$

Основной недостаток приборов, изготовленных с помощью МВЕ, – высокая трудоемкость их изготовления и высокая стоимость [87].

2.1.4. Полевые элементы Холла

В последние годы, благодаря достижениям микроэлектроники, связанным с внедрением структур типа «кремний на изоляторе», появилась возможность разработки принципиально новых магниточувствительных элементов, использующих эффект Холла.

Такие приборы получили условное наименование «полевые датчики Холла» (ПДХ).

В зарубежной аппаратуре эти приборы известны под названием «FEHS-Field-effect, Holl sensor.»

Структура и топология ПДХ даны на рис. 2.17. На рис. 2.18 рассмотрены типичные зависимости основных параметров ПДХ от напряжения на затворе.

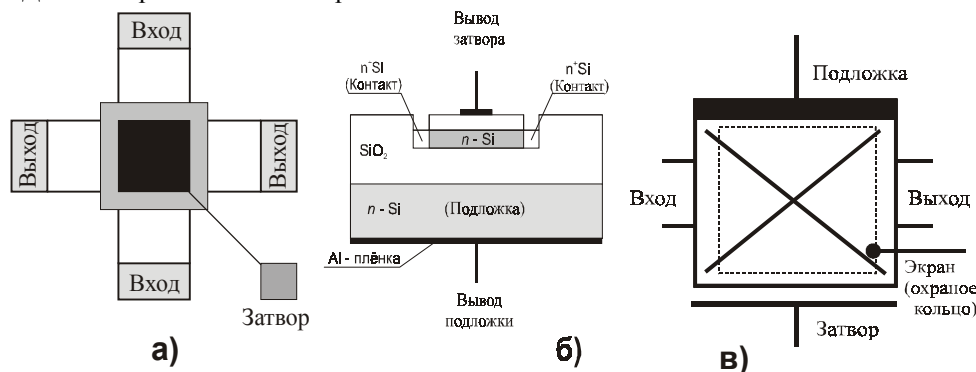


Рис. 2.17. Полевой элемент Холла: а – топология; б – структура; в – схематическое изображение

Принцип действия ПДХ основан на широко известном эффекте Холла и понятен из рис. 2.17. Рабочее тело датчика сформировано внутри кремниевого кристалла. Прибор снабжен затвором (управляющим электродом), а также входными и выходными контактами. Кроме того, имеются выводы от подложки и специального экранирующего электрода, обеспечивающего работоспособность прибора при малых токах управления. Подложка может быть использована в качестве второго затвора.

При использовании полевых датчиков Холла необходимо учитывать некоторые особенности их функционирования. Изменяя потенциал затворов (верхнего или нижнего), можно регулировать остаточное напряжение в ПДХ, то есть изменять разность потенциалов между холловскими контактами, возникающую при протекании тока через датчик в отсутствие магнитного поля. Указанное обстоятельство выгодно отличает ПДХ от традиционных датчиков Холла. Кроме того, поскольку толщина слоя Si в КНИ структуре (примерно 200 нм), что в несколько раз меньше, чем в стандартных кремниевых датчиках Холла, изготавливаемых по эпитаксиальной технологии, постольку и чувствительность ПДХ пропорционально выше. Уменьшение толщины проводящего канала с помощью полевого эффекта обеспечивает возможность управления магнитной чувствительностью ПДХ (см. рис. 2.18), величина которой сопоставима с таковой для ЭХ на основе GaAs. Омическое сопротивление «открытого» канала ПДХ составляет от 10 до 120 кОм, что – при стандартных значениях напряжения источника питания (5 или 9В) – определяет весьма низкое значение тока управления (50–400 мкА), которое, по крайней мере, на порядок величины меньше, чем у традиционных полупроводниковых ЭХ. Последнее обуславливает не только рекордно высокую удельную магнитную чувствительность ПДХ (до 10000 В/А г Тл), но и существенно более низкий уровень его собственных шумов, то есть высокую пороговую чувствительность прибора.

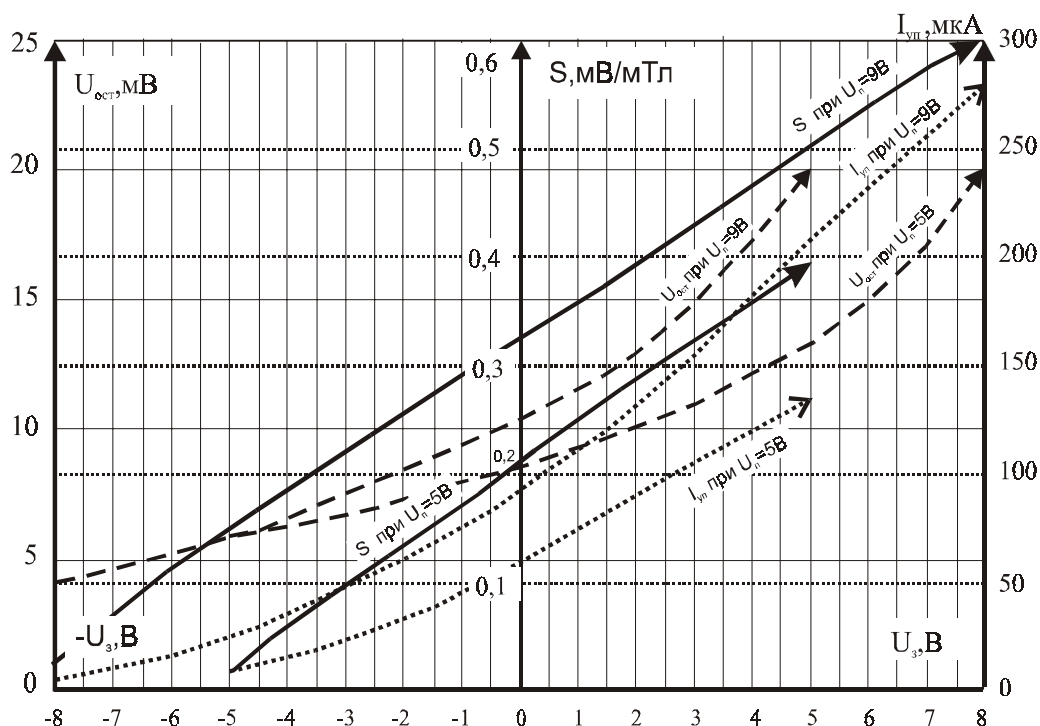


Рис. 2.18. Выходные характеристики ПДХ на КНИ

При использовании полевых датчиков Холла необходимо учитывать некоторые особенности их функционирования. Изменяя потенциал затворов (верхнего или нижнего), можно регулировать остаточное напряжение в ПДХ, то есть изменять разность потенциалов между холловскими контактами, возникающую при протекании тока через датчик в отсутствие магнитного поля. Указанное обстоятельство выгодно отличает ПДХ от традиционных датчиков Холла. Кроме того, поскольку толщина слоя Si в КНИ структуре (примерно 200 нм), что в несколько раз меньше, чем в стандартных кремниевых датчиках Холла, изготавливаемых по эпитаксиальной технологии, постольку и чувствительность ПДХ пропорционально выше. Уменьшение толщины проводящего канала с помощью полевого эффекта обеспечивает возможность управления магнитной чувствительностью ПДХ (см. рис. 2.18), величина которой сопоставима с таковой для ЭХ на основе GaAs. Омическое сопротивление «открытого» канала ПДХ составляет от 10 до 120 кОм, что – при стандартных значениях напряжения источника питания (5 или 9В) – определяет весьма низкое значение тока управления (50–400 мкА), которое, по крайней мере, на порядок величины меньше, чем у традиционных полупроводниковых ЭХ. Последнее обуславливает не только рекордно высокую удельную магнитную чувствительность ПДХ (до 10000 В/А г Тл), но и существенно более низкий уровень его собственных шумов, то есть высокую пороговую чувствительность прибора.

Конструкция ПДХ позволяет осуществлять измерения ЭДС -Холла в режиме цифровой или аналоговой модуляции потенциала на полевых электродах (затворах), что существенно облегчает возможность регистрации слабых сигналов. ПДХ позволяют уверенно регистрировать магнитные поля с индукцией около 10^{-7} Тл.

Конструктивное оформление приборов весьма разнообразно. Кремниевый кристалл размещается в стандартном или оригинальном корпусе.

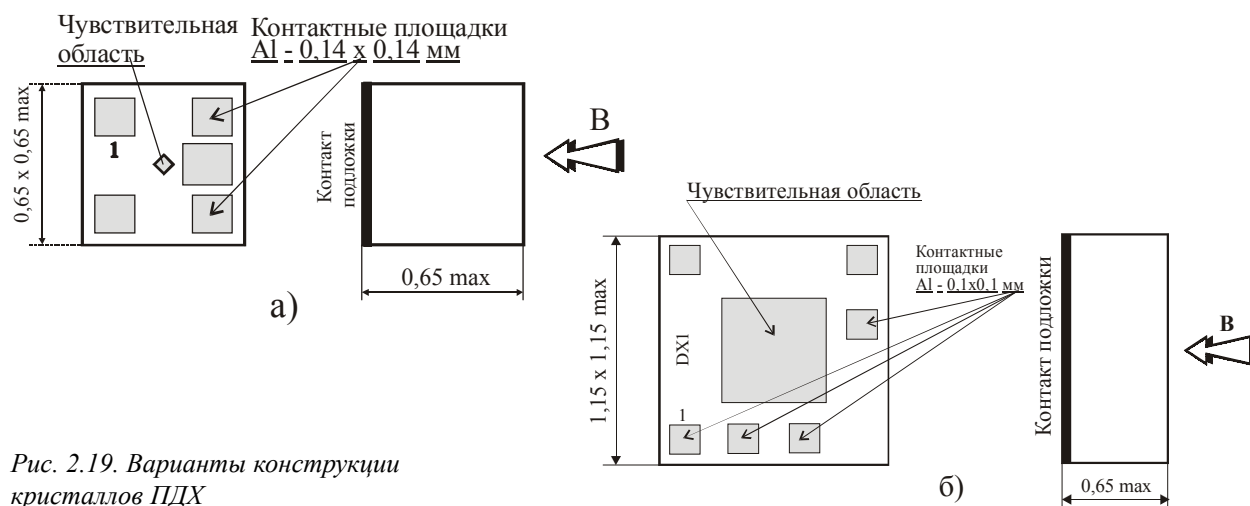


Рис. 2.19. Варианты конструкции кристаллов ПДХ

Кроме магнитной чувствительности ПДХ обладают достаточно высокой чувствительностью к инфракрасному (0,7–0,85 мкм) и радиационному излучениям. Эти приборы могут использоваться в качестве датчиков ИК-излучения или датчиков радиации.

Предельная рабочая температура ПДХ при соответствующей упаковке достигает 250 °С.

Варианты конструкции и топологии кристаллов ПДХ приведены на рис. 2.19 и 2.20.

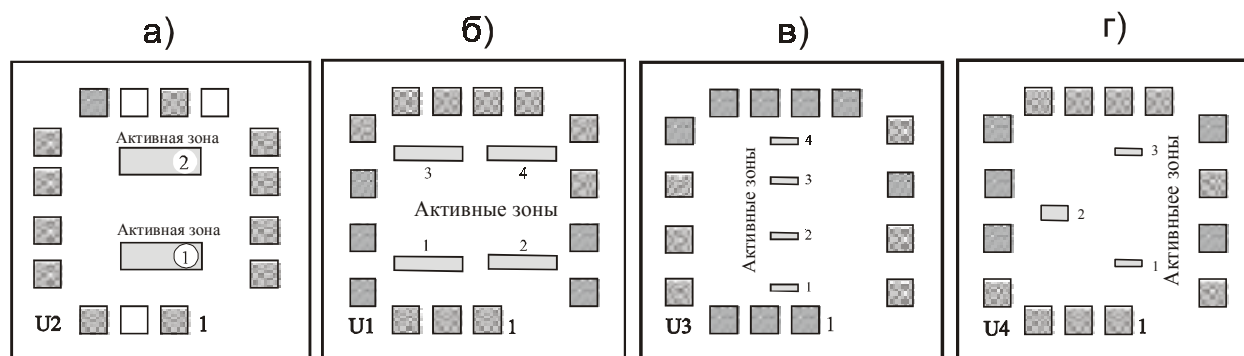


Рис. 2.20. Варианты топологии кристаллов ПДХ: а – двухэлементный; б – четырехэлементный (матрица); в – четырехэлементный (линейка); г – трехэлементный (линейка)

Возможные варианты герметизации кристаллов ПДХ приведены на рис. 2.21.

Они могут размещаться в стандартных металлостеклянных корпусах типа 401.14–5 без крышки (рис. 2.21а). «Колодец» корпуса герметизирован прозрачным или непрозрачным кремнеорганическим компаундом. Возможно размещение кристаллов в DIP корпусе (рис. 2.21б) или на печатной микросхеме (рис. 2.21в).

ПДХ отличаются высокой удельной магнитной чувствительностью, минимальным энергопотреблением, малой постоянной времени, высоким геометрическим разрешением и расширенным рабочим температурным диапазоном [4, 48, 58, 110].

Основные параметры разработанных АОЗТ «ЛБС» вариантов ПДХ приведены в главе 9 тома 2.

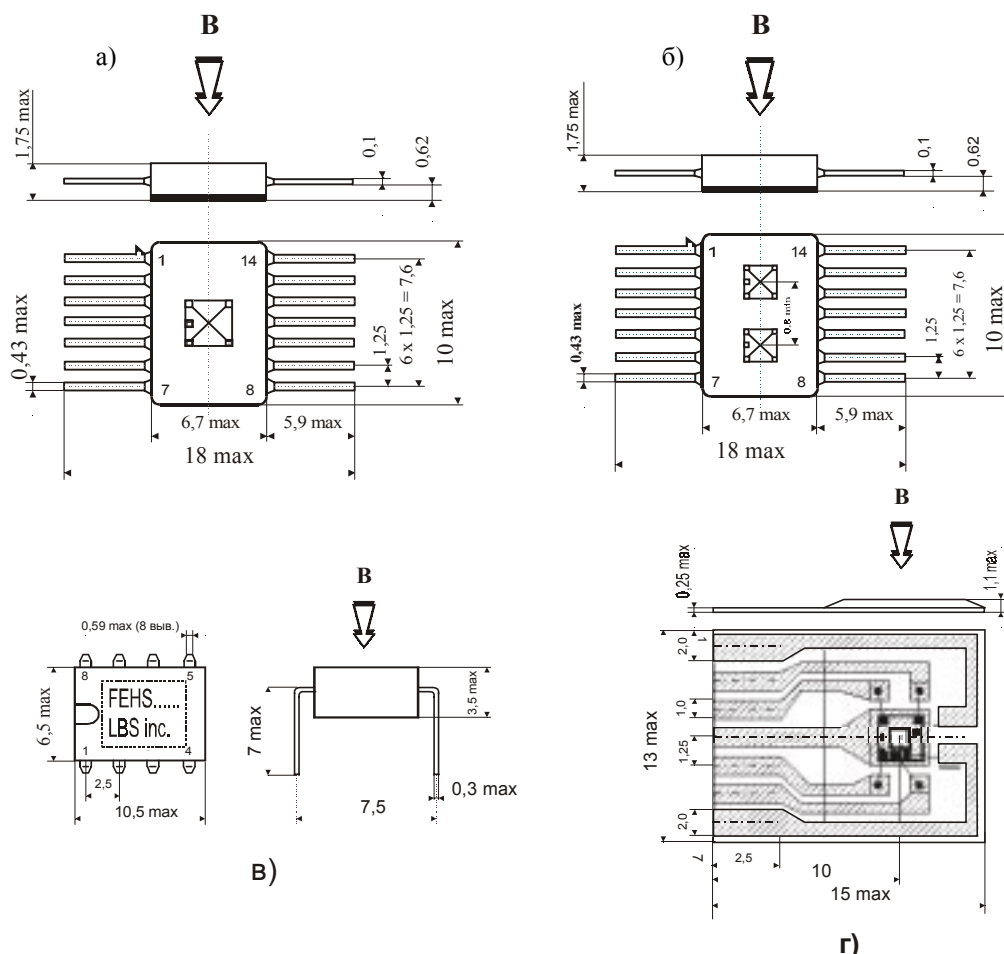


Рис. 2.21. Возможные варианты герметизации кристаллов ПДХ: а – в металлостеклянном корпусе; б – в пластмассовом DIP корпусе; в – на печатной микросхеме

2.1.5. Производство и образцы элементов Холла

В Советском Союзе разработкой и выпуском элементов Холла занималось более 30 организаций, среди которых наиболее известными являются: ОВНИИЭМ в г. Истра Московской области (приборы типа ДХГ-0,5, ДХГ-0,5с, ДХГ-0,5м, ДХГ-2С, ДХК-7АК, ДХК-14, ДХК-74, ДПК-1, ХАГ-П4, ХИМ, ХИМ-С2, ХИМ и др.); НПО «Вега» в г. Бердске (приборы серий ДХК и ПХЭ); ИФТТ и ПП АН БССР в г. Минске (приборы типа ИП); ОКБ ФТИ АН УзССР в г. Ташкенте (приборы типа ХАГЭ-1, ХАГЭ-2, ХАГЭ-3 и др.); завод чистых металлов в г. Светловодске (приборы типа Х101, Х112, Х201, Х212, Х501, Х511); СКТБ ФТИ АН СССР в г. Ленинграде и др.

Самую большую группу отечественных элементов Холла представляют приборы на основе геттеро-эпитаксиальных пленок InSb–GaAs, выпускаемые НПО «Вега» (г. Бердск) и НПО «Домен» (г. С.-Петербург) [67, 55, 62].

Наиболее известными отечественными приборами являются элементы Холла серии ПХЭ 602 – ПХЭ 606 и ДХК-0,5.

Среди сравнительно новых изделий можно отметить: ХИМ-С2, ДХК-7АК и ДХК-12 ПК, разработанные ОВНИИЭМ. Прибор ХИМ-С2 выполнен с системой дублирования, состоящей из двух магниточувствительных элементов (основного и резервного), расположенных симметрично относительно друг друга и параллельно друг другу и имеющих идентичные магнитоэлектрические параметры, что позволяет, в случае необходимости, заменить основной элемент резервным.

Элементы ДХК-7АК и ДХК-12 ПК обладают повышенной эксплуатационной надежностью и удобны при монтаже в аппаратуру за счет использования металлического корпуса и гибкой печатной платы в качестве внешней коммутационной цепи.

Среди зарубежных исследователей и производителей работы в данном направлении ведутся несколькими десятками фирм. Ведущими производителями элементов Холла являются японские фирмы Asahi Kasei Electronics (InSb), Matsushita Electronic Corp. (Si, Ge, GaAs, InSb), Denki Onkyo (InSb), Rohm Co. Ltd. (InSb, GaAs – до 1 млн. шт. в месяц), Toshiba (GaAs – до 700 тыс. шт. в месяц); американские фирмы IBM (Si), Radio Frequency (InAs), Texas Instrument (Si), Sprague Electric (Si), Allegro, F. W. Bell, фирмы Германии AEG Telefunken, Siemens (Si, InSb, GaAs, InAsP), Ebeco, F.W. Bell и др.

Суммарный годовой объем производства элементов Холла в мире превышает 1 млрд. шт. Номенклатура типов ЭХ насчитывает сотни наименований.

Особенностью зарубежных элементов Холла является то, что, как правило, большая часть приборов ориентируется на решение конкретных технических задачи, например: для регистрации магнитного потока, использования в качестве датчиков скорости вращения зубчатых колес и в датчиках линейного перемещения и т.д. Поэтому, все приборы имеют определенные конструктивные отличия друг от друга как своими конструктивным исполнением, так и особенностями практического использования. Зарубежная промышленность выпускает очень широкую номенклатуру этих приборов.

Из новейших образцов приборов можно отметить элемент Холла типа HS-100 с максимальной толщиной 0,3 мм, разработанный фирмой Bell Technologies (США). Приборы поставляются в flip-chip исполнении. Цена прибора составляет всего 0,3 доллара при покупке партии больше 100 шт.

Во второй части книги приведены основные параметры и габариты элементов Холла, выпускаемых наиболее известными отечественными предприятиями и ведущими зарубежными фирмами.

Обобщенные параметры элементов Холла на основе различных материалов сведены в табл. 2.4 и 2.5. В табл. 2.4 сгруппированы данные по ~200 типам промышленных образцов ЭХ, а в табл. 2.5 – по ~20 типам приборов, изготовленных по новым и новейшим технологиям.

Чувствительность большинства элементов Холла лежит в пределах от 0,05 до 10 В/Тл, ток управления – от 1 до 200 мА, нелинейность преобразования обычно составляет от 0,1 до 5,0%, температурный коэффициент чувствительности – от 0,03 до 0,5% на градус Цельсия.

Большинство элементов Холла обладает достаточно высокой линейностью преобразования. Например, кремниевые ЭХ показывают хорошую линейность при индукции магнитного поля до 1–1,5 Тл.

На рис. 2.22 приведена типовая выходная характеристика интегрального кремниевого элемента Холла.

Рис. 2.22. Типовая выходная характеристика интегрального кремниевого элемента Холла

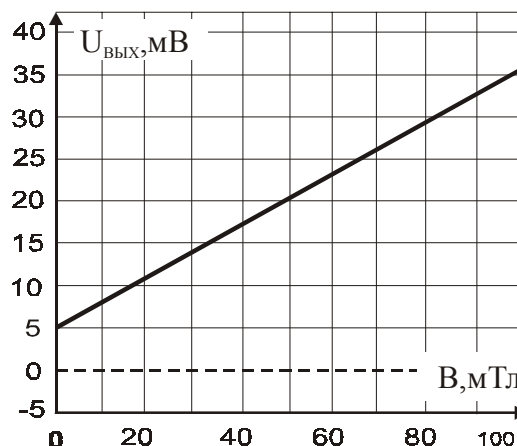


Таблица 2.4. Обобщенные параметры элементов Холла, серийно -выпускаемых, зарубежными производителями

№№ п/п	Материал МЧЭ	Размер чувствительной зоны, мм	Входное сопротивле- ние, Ом	Выход- ное сопротив- ление, Ом	Ток управле- ния, мА	Магнит- ная чувстви- тельность, В/Тл	Удель- ная магнит- ная чувстви- тельность, В/Тл*А	Остаточ- ное напряже- ние, В/А	Темпе- рат. коэф- фициент ЭДС Холла, %/ °С	Темпера- турный коэф- фициент сопро- тивле- ния, %/ °С	Коэф- фициент нелиней- ности, %	Диапазон рабочих темпера- тур, °С
1	Ge	От 1,8 x 0,6 До 12 x 6	30 ... 1800	24...650	2...45	0,01...0,77	2,5...100	0,025...10	0,02...0,5	0,5	0,1...1	-60... +100
2	Si	От 2,6 x 1,6 До 12 x 6	500... 3000	500... 3000	3...15	0,22... 1,35	45...90	1,1...3,1	0,08...2		2...3	-60... +125
3	InAs	От 1,4 x 0,7 До 4 x 2 От Ø=0,76 До Ø=1,02	0,5...160 1...2	0,5...360 1...2	10...200 100...300	0,075... 0,66 0,0056... 0,011	0,5...15 0,056... 0,11	0,001... 0,45 0,003	0,05...0,1 0,01	0,1...0,2 0,6	1...2 1...2	-269... +185 -269... +102
4	InAsP	От 0,5 x 0,5 До 1 x 1	5...30	3...70	25...200	0,055... 0,29	0,88...4	0,001... 0,0025	0,03...0,1	0,1...0,2	1...2	-55... +150
5	InSb	От 0,2 x 0,2 До 6,5 x 2	10...530	10...530	6...100	0,08...3	0,85...500	0,005... 1,7	0,1...2	0,1...0,2	1...2	-20... +90
6	GaAs	От 0,5 x 0,5 До 1 x 1	10...100	10...100	180	0,1...0,23	0,55...1,3	0,0025... 0,45			1...2	-100... +100
7	GaAs гет.эпит	От 0,127 x 0,127 До 1 x 1	100... 1500	100... 1500	1...40	0,09...3	20...280	2,8...20	0,03... 0,06	0,15...0,3	1...2	-50... +125
8	InAs- GaAs гет.эпит.	От 3 x 1 До 4 x 1	6...50	2...50	20...150	0,4...0,6	2...30	0,2...0,3	0,02...0,0 5	0,05...0,3	1...2	-10... +100
9	InSb- GaAs	От 3 x 1,5 До 4 x 2	200... 3000	200... 3000	3...15	0,5...0,7	230...330	1,7...2	0,1...0,3	0,6	0,5	-60... +125
10	InSb- GaAs гет.эпит.	От 0,2 x 0,05 До 2 x 0,5	2...15	2...15	100	0,01...0,5	0,1 ...5	0,0002... 0,001	0,05...0,1	0,02...0,5	0,3...0,5	-270... +100
11	CdHgTe пленка	От 1 до 22 мм ²	35...90	35...90	15...30		18...550	0,13... 0,33	0,05...0,2	0,2...0,6		0...+55

Таблица 2.5. Обобщенные параметры опытных образцов элементов Холла, выпускаемых, зарубежными производителями

№№ п/п	Материал МЧЭ	Размер чувстви- тельной зоны, мм	Входное сопро- тивле- ние, Ом	Выход- ное сопро- тив- ление, Ом	Ток управле- ния, мА	Магнит- ная чувстви- тель- ность, В/Тл	Удель- ная магнит- ная чувстви- тель- ность, В/Тл*А	Оста- точное напря- жение, В/А	Темпе- раурный коэф- фициент ЭДС Холла, %/ °С	Темпе- ратурный коэф- фициент сопро- тивле- ния, %/ °С	Коэф- фициент нелиней- ности, %	Диапазон рабочих темпера- тур, °С
1	InSb пленка (МВЕ)	До 1 мм ²	240... 550	240... 550	1,8... 4,1	3...6,4	3000... 6400	1,7... 3,9	0,05	Н/Д	Н/Д	0...+100
2	InAs пленка (МВЕ)	До 1 мм ²	400... 700	400... 700	8,6... 15	2...6	130... 690	1,1	0.05	Н/Д	Н/Д	0...+100
3	Si (КНИ) FENS (ПДХ)	От 0,002 x 0,002 До 0,5 x 0,5	от 20k до 120k	от 20k до 120k	0,05... 0,6	0,08...1,1	500... 10000	0,1... 16	0,08... 0,36	0,2... 0,34	0,5... 1,0	-270... +250

В табл. 2.6 даны основные параметры трех групп элементов Холла, выпускаемых ведущим зарубежным производителем – фирмой F. W. Bell.

Таблица 2.6. Основные параметры трех групп элементов Холла, выпускаемых фирмой F. W. Bell

Наимено- вание серии прибора	Материал МЧЭ	Ток управле- ния, мА	Входное сопротив- ление, Ом	Выходное сопротив- ление, Ом	Магнитная чувстви- тельность, В/Тл	Темпера- турный коэффициент ЭДС Холла, % / °С	Диапазон рабочих температур, °С
RH	InAs	100...200	1...6	1...6	0,008...0,5	-0,05	-269...+100
FH	InSb	До 10	20...60	40...480	0,04...0,25	-0,05	-55...+100
GH	GaAs	До 5	450...900	580...1700	0,5...1,4	-0,08	-55...+175

Интервал рабочих температур для ЭХ, изготовленных из германия, в пределах от –60 до +70 °С, для кремниевых – от –60 до +120 °С.

Предельная рабочая температура для элементов Холла из арсенида галлия составляет 250–300 °С при $TC_g = 0,05\%$ /на градус Цельсия. Элементы из InSb и InAs могут применяться при температурах от 4,2 до 300 °К при $TC_g = 0,05\text{--}0,5\%$ на градус Цельсия.

С точки зрения устойчивости к воздействию температуры окружающей среды материалы располагаются в следующей последовательности: Ge, Si, GaAs.

2.1.6. Частотные характеристики элементов Холла

Элементы Холла обладают очень малой инерционностью.

Быстродействие ЭХ определяется временем пролета носителей через активную область кристалла. При правильном выборе исходного полупроводникового материала с высокой подвижностью носителей заряда и субмикронных размерах МЧЭ верхняя граничная частота может составить порядка 1 ГГц. Однако, при высоких частотах модуляции магнитного поля индукционные помехи и наводки практически сужают полосу рабочих частот до 1 МГц.

Особое значение имеет конструкция элемента Холла, так как активная область и холловские выводы образуют виток, на котором переменное магнитное поле наводит ЭДС (так называемую квадратурную помеху), величина которой зависит от площади витка. В приборе с малой площадью витка «активная область–выводы Холла» квадратурная помеха стремится к нулю, в результате чего появляется возможность значительного увеличения рабочей частоты.

2.1.7. Ориентационная характеристика элемента Холла

Ориентационная характеристика элемента Холла определяется диаграммой направленности. Под диаграммой направленности подразумевают зависимость $\gamma(\alpha)$, где γ – выходная величина преобразователя магнитного поля, а α – угол между магнитной индукцией B и магнитной осью преобразователя $-i_m^0$.

Обычно с целью удобства сопоставления диаграмм направленности, определенных при различных значениях B , на графиках откладывают не значение γ , а значение величины:

$$\lambda = \gamma(\alpha) / |B| \times |S|_{B_0} \quad (2.7)$$

где S – относительная чувствительность ПМП, другими словами производится нормирование диаграмм.

Для точного измерения составляющих магнитной индукции желательно иметь диаграмму направленности ПМП, симметричную относительно оси X . Именно такую диаграмму направленности имеют элементы Холла в слабых магнитных полях при условии полной компенсации их нулевого сигнала.

Вместе с тем замечено, что с увеличением B симметрия диаграммы направленности нарушается. Это обстоятельство приводит при определенных условиях к погрешностям измерения, как модуля, так и составляющих магнитной индукции. (Подробнее см. [81]).

В качестве примера на рис.2.23.а. приведена диаграмма отечественного элемента Холла типа Х112, определенная при различных значениях B и при скомпенсированном нулевом сигнале. [7]

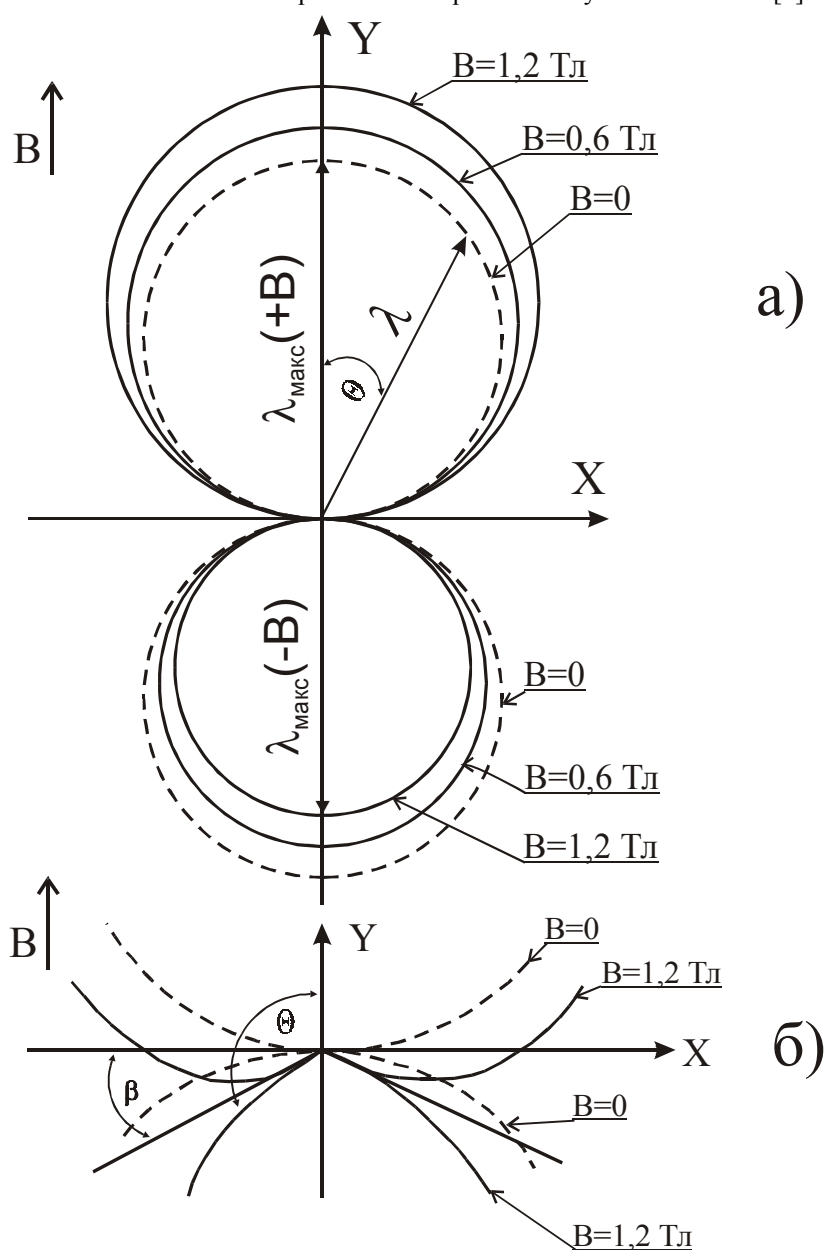


Рис. 2.23. Диаграмма направленности элемента Холла типа Х112

Начальный участок этой диаграммы показан на рис. 2.23.б.

Из рисунка видно, что рост асимметрии диаграммы относительно оси X с увеличением В проявляется в изменении отношения.

$$\xi = [\lambda_{\max}(+B)] / [\lambda_{\max}(-B)] \quad (2.8)$$

где $[\lambda_{\max}(+B)]$ и $[\lambda_{\max}(-B)]$ – максимальные значения нормируемой выходной величины при направлении магнитной оси элемента Холла i_m^0 , совпадающем с направлением В и противоположном ему), а также в приращении угла $\beta = 90^\circ - \alpha$ между осью X и направлением i_m^0 , соответствующем $\alpha=0$ (при идеальной диаграмме направленности, когда $\xi = 1$ и $\beta = 0$). (Подробнее см.[7])

2.1.8. Применение элементов Холла

Дискретные элементы Холла используются для измерения магнитных полей, исследования свойств магнитных материалов, измерения электрических и неэлектрических величин, исследования характеристик электрических машин; для применения в качестве активных элементов в различных вычислительных устройствах (например, для выполнения элементов счета: сложения и вычитания, умножения и деления, возведения в степень и извлечения корня); для выполнения функций отдельных элементов различных радиотехнических цепей (линейные и квадратичные детекторы, модуляторы, смесители, демодуляторы, перемножители и удвоители, генераторы, усилители и др.), а также в качестве чувствительных элементов при создании различного рода бесконтактных реле, компенсаторов, компараторов и всевозможных систем регулирования. Благодаря своим уникальным свойствам элементы Холла могут использоваться как датчики механических деформаций и напряжений, а также в качестве ориентационных датчиков.

Современная групповая технология ИС позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе элементов Холла, которые могут группироваться в линейные и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом их организации.

Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей (лент, карт и т.п.).

Подробнее о способах организации многоканальных и многоэлементных магниточувствительных структур, а так же о возможных областях их применения можно прочесть в главах 4 и 6.

Особенности применения дискретных элементов Холла

При использовании дискретных элементов Холла следует учитывать некоторые их особенности, а именно: относительно высокое остаточное напряжение (до 10 мВ и более), и зависимость параметров ЭХ от температуры окружающей среды.

Кроме того, необходимо помнить о том, что величина остаточного напряжения ($U_{ост}$), как правило, зависит от направления и значения тока управления, а также от температуры элемента.

Способы стабилизации основных параметров элементов Холла

Известны различные способы стабилизации параметров ЭХ и уменьшения влияния остаточного напряжения на параметры аппаратуры, как за счет применения определенных конструктивных решений, так и в результате использования схемотехнических мер.

Компенсация остаточного напряжения ($U_{ост}$) осуществляется использованием специальных схем питания элементов Холла. Простейший вариант схемотехнического решения – включение дополнительного переменного резистора R (см. рис. 2.24). Варианты включения, показанные на рис. 2.24.а, 2.24.б и 2.24.е, не влияют на термостабильность ЭХ. Более термостабильными являются варианты рис. 2.24.г и 2.24.д. Для повышения термостабильности на одном конце МЧЭ выделяется два токовых электрода и внешним потенциометром R устанавливается соотношение токов через них (рис. 2.24.е).

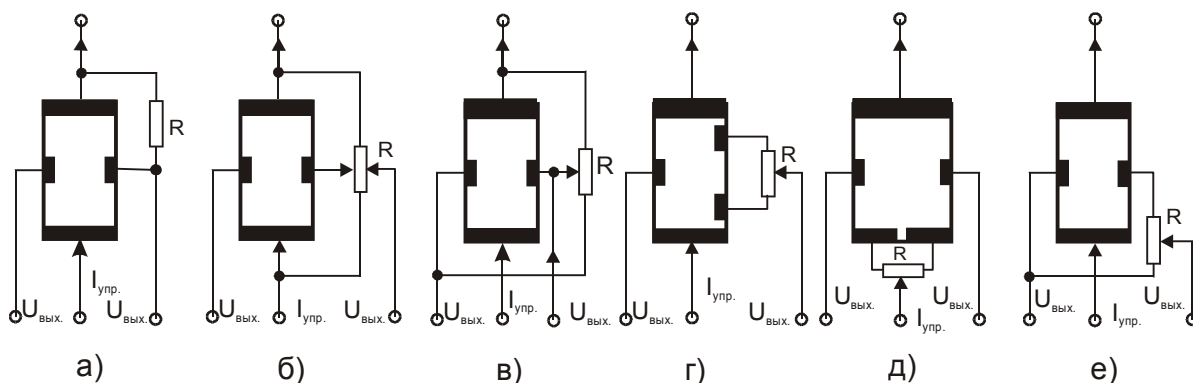


Рис. 2.24. Схемы компенсации остаточного напряжения элементов Холла

Аналогично можно заменить один их «холловских» электродов двумя, разделенными по длине (рис. 2.24.г).

Указанная термокомпенсация осуществима лишь в относительно узком интервале температур. Во-первых, вследствие разной зависимости от температуры удельного сопротивления материала МЧЭ и компенсирующего элемента (резистора R) и, во-вторых, из-за зависимости сопротивления контактов МЧЭ от температуры, что особенно заметно при больших значениях тока управления.

Питание элементов Холла

В зависимости от решаемых задач питание элементов Холла может осуществляться от источника напряжения ($U_{\text{п}} = \text{const.}$) или от источника тока ($I_{\text{уп}} = \text{const.}$).

В качестве примера на рис. 2.25 показан характер изменения чувствительности кремниевых ЭХ при питании его от источника напряжения. В этом случае температурный коэффициент чувствительности (TC_g) практически постоянен в приведенном интервале температур и составляет $-0,25\%$ на градус Цельсия.

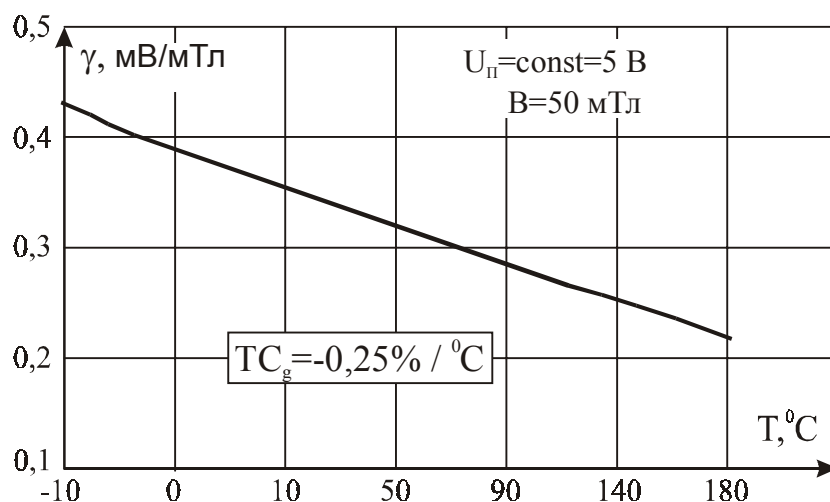


Рис. 2.25. Температурная зависимость чувствительности кремниевых элементов Холла при постоянном напряжении питания и в равномерном магнитном поле

Характер изменения чувствительности кремниевых ЭХ при питании его от источника тока показан на рис. 2.26. Коэффициент TC_g в данном случае от образца к образцу имеет некоторый разброс и составляет $+0,04\%$ на градус Цельсия [47].

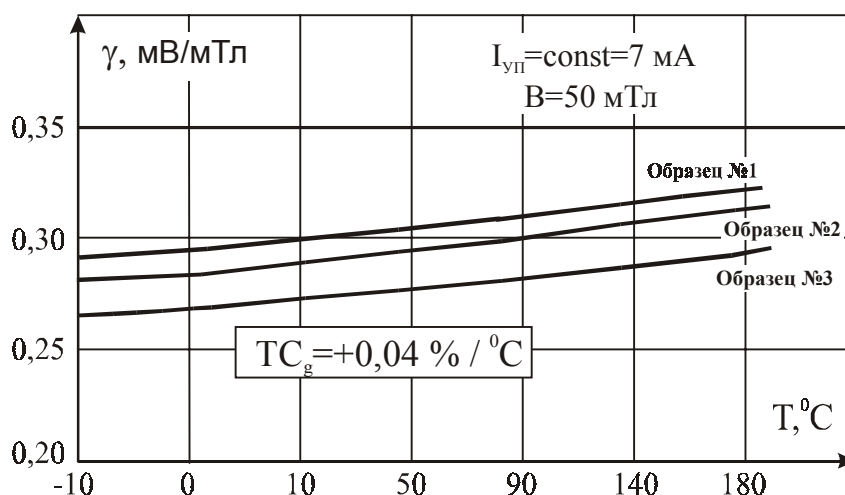


Рис. 2.26. Температурная зависимость чувствительности кремниевых элементов Холла при постоянном токе управления и в равномерном магнитном поле

Однако применение постоянного тока для питания ЭХ имеет ряд недостатков, ограничивающих использование ЭХ в высокоточной аппаратуре.

Питание элементов Холла может осуществляться и переменным синусоидальным или импульсным током. При этом каждая из схем питания имеет свои особенности и выбирается исходя из конкретных условий применения ЭХ.

В большинстве случаев при практическом использовании элементы Холла питаются от источников переменного напряжения (или тока). Существует множество вариантов таких схем питания.

На рис. 2.27 и 2.28 без подробных разъяснений приведены возможные варианты питания элементов Холла. Питание ЭХ осуществляется от источников прямоугольных или синусоидальных импульсов.

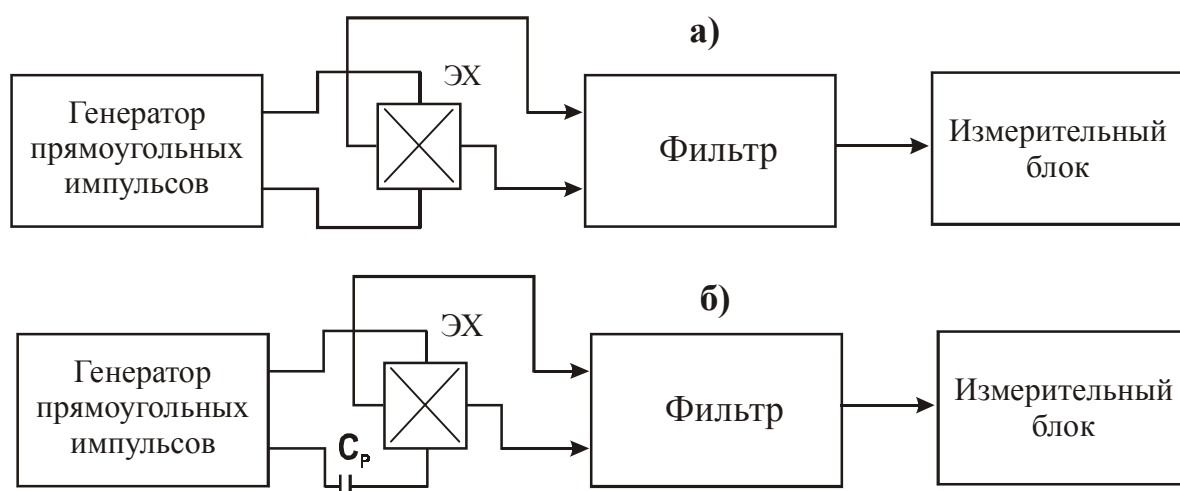


Рис. 2.27. Схемы питания дискретных элементов Холла: а – однополярными прямоугольными импульсами; б – двухполярными прямоугольными импульсами

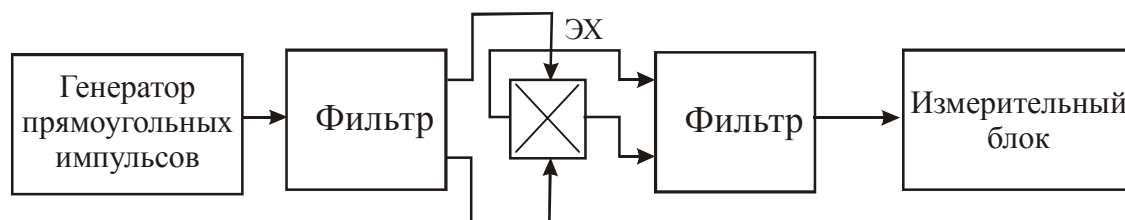


Рис. 2.28. Схемы питания дискретных элементов Холла током, изменяющимся во времени по гармоническому закону

Используются два варианта питания элемента Холла прямоугольными импульсами: однополярными и разнополярными симметричными. В первом случае (рис. 2.27.а) через ЭХ протекают не только гармонические, но и постоянные составляющие импульсов тока питания. Во втором случае (рис. 2.27б) на элемент Холла поступают только переменные составляющие тока питания, что осуществляется применением разделительного конденсатора C_p или трансформатора во входных цепях ЭХ.

Источники прямоугольных импульсов обеспечивают стабильные импульсы по амплитуде и длительности в широком диапазоне рабочих температур и при более простых схемных решениях.

В большинстве промышленных магнитометров отечественного и зарубежного производства используют схемы питания дискретных элементов Холла синусоидальным током (рис. 2.28). Это связано с необходимостью увеличения отношения сигнал/шум, что достигается введением избирательных элементов в схему обработки сигнала ЭХ. При питании ЭХ током, изменяющимся во времени по синусоидальному закону, требуется использование генераторов сигналов синусоидальной формы, высокостабильных как по амплитуде, так и по частоте (подробнее см. [8]).

Температурная компенсация функции преобразования элементов Холла сигналом из входной цепи

При питании элемента Холла от источника напряжения стабилизируется остаточное напряжение $U_{ост}$, однако появляется температурная зависимость чувствительности прибора. Погрешность, вызванная температурной зависимостью чувствительности, носит мультипликативный характер. Следовательно, компенсация такой погрешности может быть получена нелинейными операциями, что ограничивает точность компенсации [46].

При питании от источника тока стабилизируется чувствительность элемента Холла, остаточное напряжение имеет сильную температурную зависимость, которая, однако, может быть компенсирована линейными способами.

Следующей особенностью метода компенсации является то, что компенсирующий сигнал из входной цепи ЭХ не должен создавать гальванической связи с его входной цепью, так как элемент Холла является четырехполюсником, вход и выход которого не имеют общей точки. От качества гальванической развязки и стабильности развязывающего звена в той или иной степени зависит точность работы схемы компенсации.

Схемы температурной компенсации при питании элемента Холла от источника напряжения

Из множества схем наиболее широко применяются схемы:

- с оптронной гальванической развязкой;
- с гальванической развязкой на логометре. [Под логометром в данном случае понимается измерительный прибор, показания которого пропорциональны отношению двух электрических величин (обычно сил тока)];
- с трансформаторной гальванической развязкой;
- с питанием элемента Холла от импульсного источника питания.

Схемы температурной компенсации при питании элемента Холла от источника тока

При питании ЭХ от источника тока используются схемы:

- с оптронной гальванической развязкой;
- с гальванической развязкой на дифференциальном усилителе.

На рис. 2.29 в качестве примера дана структурная схема температурной компенсации элемента Холла с оптронной развязкой при питании ЭХ от источника напряжения.

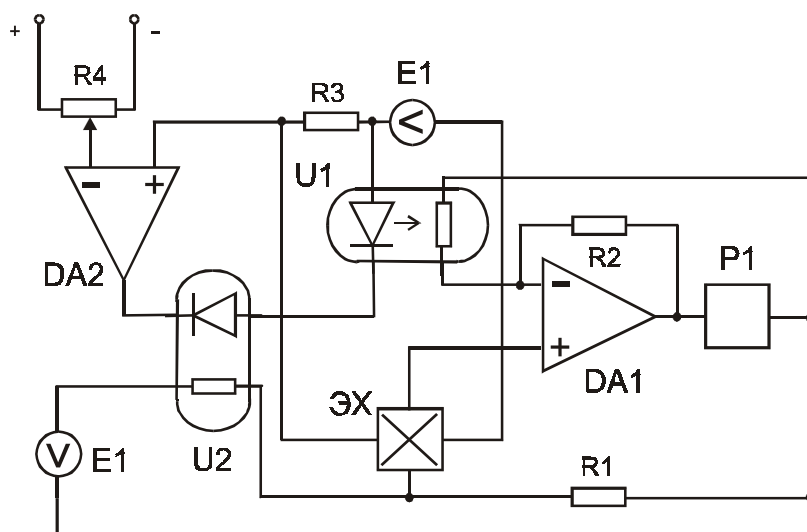


Рис. 2.29. Схема температурной компенсации с оптронной развязкой при питании ЭХ от источника напряжения: DA1, DA2 – операционные усилители; E1, E2 – источники напряжения; U1, U2 – оптроны; P1 – регистрирующее устройство

Схема (рис. 2.29) работает следующим образом. Выходной сигнал с ЭХ поступает на регистрирующее устройство P1 через усилитель сигнала DA1. Коэффициент передачи усилителя сигнала определяется сопротивлениями отрицательной обратной связи операционного усилителя DA1 – резистором R2 и выходным сопротивлением оптрона U1. Изменение последнего компенсирует мультипликативную составляющую температурного изменения выходного сигнала ЭХ, компенсация аддитивной составляющей осуществляется цепью, состоящей из источника напряжения E1, выходного сопротивления оптрона U2 и резистора R1.

При питании ЭХ от источника напряжения E2 падение напряжения на резисторе R3 пропорционально входному току при условии $R3 \ll R_{BX}$, где R_{BX} – входное сопротивление элемента Холла.

Изменение температуры ЭХ вызывает изменение R_{BX} , входного тока, падение напряжения на резисторе R3 и далее через усилитель DA2 смещение рабочих точек оптронов U1 и U2. Выходное сопротивление оптронов, в свою очередь, изменяют сигналы, компенсируя соответственно аддитивную (цепь U2, R1, E1) и мультипликативную (цепь U1, R2, DA1) температурные погрешности.

Аналогично температурной происходит компенсация изменения чувствительности элемента Холла вследствие изменения проводимости полупроводника в магнитном поле. Последнее обстоятельство может быть использовано для решения проблемы обеспечения взаимозаменяемости ЭХ, так как градуировочная характеристика всего устройства сохраняет линейность. Линейность передаточной характеристики в целом позволяет производить поверку прибора только в одной точке диапазона магнитных полей. Устройство отличается высокой точностью температурной компенсации, позволяющей производить измерения в широком диапазоне неконтролируемо изменяющейся температуры.

Схема с оптронной развязкой для температурной компенсации при питании элемента Холла от источника тока

В режиме питания элемента Холла от источника тока аддитивная составляющая температурной погрешности реальной функции преобразования существенно больше, чем в режиме питания от источника напряжения, где остаточное напряжение $U_{\text{ост}}$ в диапазоне температур стабилизировано, вследствие чего необходимо компенсировать только напряжение разбаланса ЭХ.

В связи с отсутствием мультипликативной составляющей погрешности при питании элемента Холла от источника тока упрощается схема компенсирующего устройства и обеспечивается более высокая точность компенсации при измерениях относительно сильных магнитных полей.

На рис. 2.30 приведена структурная схема температурной компенсации элемента Холла с оптронной развязкой при питании ЭХ от источника тока.

Рис. 2.30. Схема температурной компенсации с оптронной развязкой при питании ЭХ от источника тока: DA1 – операционный усилитель; E1 – источник тока; E2 – регулируемый источник тока; U1 – оптрон; P1 – регистрирующее устройство

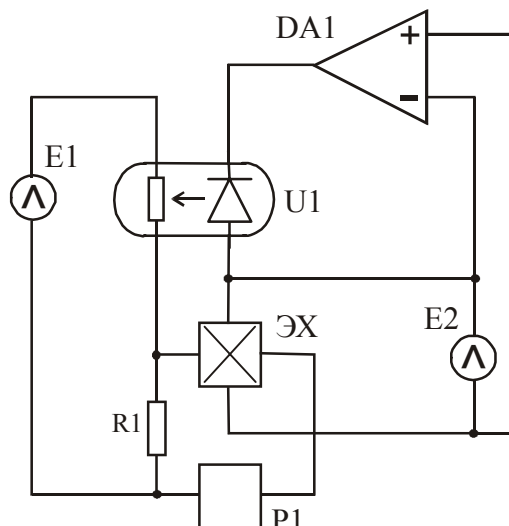


Схема (рис. 2.30) работает следующим образом. При начальной температуре элемента Холла и рабочем токе генератора тока E2 на выходе усилителя DA1 существует сигнал, величина которого выбором режима работы усилителя DA1 устанавливается так, чтобы рабочая точка оптрона U1 находилась на линейном участке передаточной характеристики. Изменяя напряжение регулируемого источника E1, можно добиться того, чтобы падение напряжения на резисторе R1 было равно по величине и противоположно по знаку нулевому напряжению $U_{\text{ост}}$ элемента Холла.

Компенсация температурного изменения остаточного напряжения $U_{\text{ост}}$ происходит следующим образом. При отклонении температуры от начальной изменение электрического сопротивления элемента Холла последовательно изменяет падение напряжения на самом ЭХ, выходное сопротивление оптрона и величину компенсирующего напряжения на резисторе R1.

Звеном, ограничивающим точность компенсации в рассматриваемой схеме, является, в основном, оптрон U1, обеспечивающий гальваническую развязку цепей компенсации, связанных с входом и выходом элемента Холла. (Подробнее см. [46].)

Любая термокомпенсация выполняется лишь в относительно узком диапазоне температур, во-первых, вследствие разной зависимости от температуры удельного сопротивления полупроводника и компенсирующего элемента и, во-вторых, из-за зависимости сопротивления контактов ЭХ от температуры.

Например, для ЭХ из сурьмянистого индия (InSb) температурная компенсация с точностью 2% достигается подключением токовой цепи к источнику постоянного напряжения, при этом используется то обстоятельство, что для этого материала зависимость постоянной Холла (K_H) и удельного сопротивления (r) от температуры практически одинаковы.

Кроме того, для температурной компенсации ухода параметров элементов Холла используются полупроводниковые или металлические терморезисторы, включаемые параллельно или последовательно в цепь питания ЭХ или в его выходную цепь. Расчет схем для устранения температурной погрешности приведен в работе [67, 46].

Температурная погрешность может быть устранена термостатированием элемента, а также питанием его от источника переменного тока. Для этой цели элемент снабжается нагревателем и датчиком температуры. При разделении цепей питания по частоте сам ЭХ может быть использован как нагреватель, а в некоторых случаях и как термодатчик.

При проектировании магнитоэлектронных устройств следует учитывать влияние максимального тока управления на параметры и характеристики элементов Холла, что особенно важно при использовании низкоомных МЧЭ, функционирующих при $I_{\text{уп}} > 50$ мА.

Максимально допустимое значение тока управления в значительной степени определяется условиями эксплуатации ЭХ, то есть условиями теплоотвода и температурой окружающей среды, а также максимально допустимой температурой нагрева магниточувствительного элемента.

Обычно в паспорте на прибор задается максимально допустимое значение тока управления для случая эксплуатации элемента Холла в среде неподвижного воздуха.

Превышение указанного в паспорте значения этого тока без принятия специальных мер по дополнительному улучшению условий теплоотдачи приводит к перегреву элемента и выводу его из строя.

Улучшением условий теплоотвода можно значительно повысить как номинальное, так и максимально допустимое значение тока управления. Так, например, если элемент Холла с обеих сторон привести в соприкосновение с металлическими полюсами магнитопровода, то ток управления можно увеличить в 1,5–2 раза [67].

Сведения об основных параметрах дискретных элементов Холла, выпускаемых отечественными и зарубежными производителями, приведены в главе 9 тома 2.

Использование элементов Холла совместно с операционными усилителями

На рис. 2.31 и 2.32 в качестве примера приведены две достаточно простые схемы магнитоприемных устройств с использованием дискретных элементов Холла и операционных и инструментальных усилителей. Эти схемы не требуют дополнительных пояснений. Они не содержат специальных элементов для термостабилизации и предназначены для использования в лабораторных условиях или в демонстрационных целях.

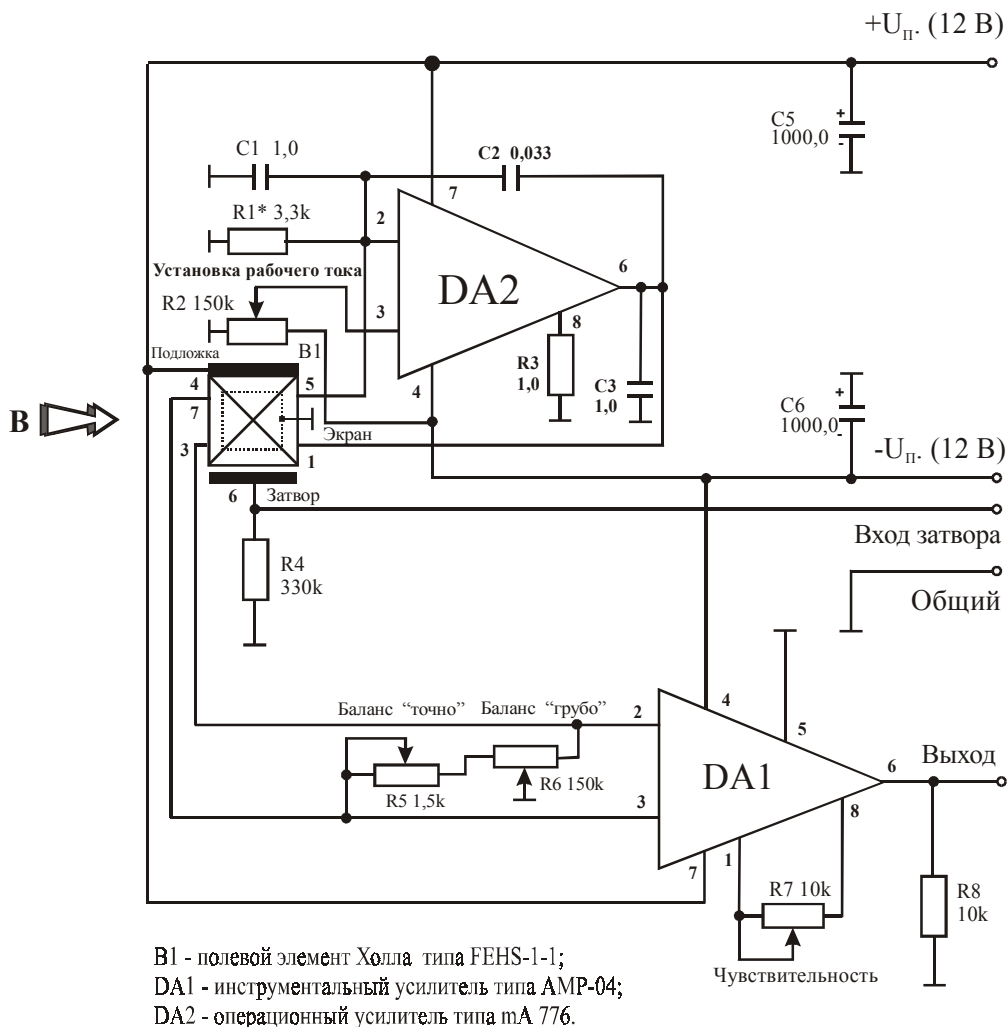


Рис. 2.31. Электрическая схема магнитоприемного устройства с использованием полевого элемента Холла (ПДХ) и инструментального усилителя

В схеме, приведенной на рис. 2.31, в качестве преобразователя магнитного поля используется полевой датчик Холла (ПДХ), который питается от источника тока, выполненного на операционном усилителе (DA2).

В качестве усилителя сигнала ЭХ используется интегральная схема инструментального усилителя AMP-04 (или INA 118). Магнитная чувствительность устройства устанавливается резистором R7.

Рабочий ток элемента Холла устанавливается при помощи резисторов R1 и R2.

Балансировка «0» производится резисторами R5 и R6.

Схема предусматривает модуляцию входного сигнала путем подачи управляющих (или модулирующих) импульсов на затвор ПДХ.

Устройство питается от двухполярного источника питания. Ток потребления составляет не более ± 10 мА при напряжении питания 12 В.

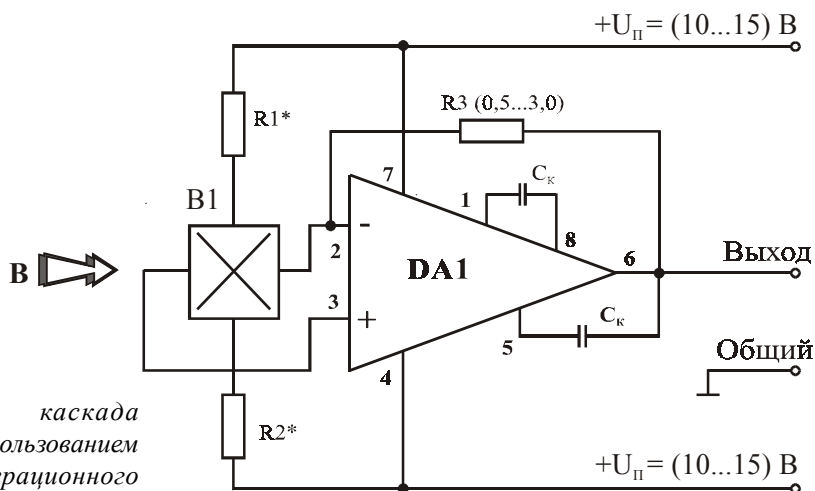


Рис. 2.32. Схема входного каскада магнитоприемного устройства с использованием кремниевого элемента Холла и операционного усилителя

DA1 - операционный усилитель типа 740 УД2Б;
B1 - элемент Холла типа ДХК-0,5.

В схеме, приведенной на рис. 2.32, в качестве преобразователя магнитного поля используется кремниевый элемент Холла типа ДХК-0,5, который подключается к цепи питания через два ограничительных резистора (R1, R2). В качестве усилителя сигнала ЭХ применяется микросхема операционного усилителя 740УД2Б в бескорпусном исполнении. Чувствительность магнитоприемного устройства устанавливается резистором R3 и резисторами R1, R2.

Особенности использования интегральных элементов Холла

В последнее время все более широкое распространение получают элементы Холла, выполненные в едином технологическом цикле и на одном кристалле вместе с другими элементами интегральных схем, обеспечивающими усиление и обработку сигнала ЭХ.

Проектирование, изготовление и применение интегральных элементов Холла имеет ряд особенностей, связанных с получением максимальной магнитной чувствительности при минимальных значениях остаточного напряжения ($U_{ост}$) и заданной стабильности указанных параметров.

Повышенное значение величины остаточного напряжения ($U_{ост}$), объясняется факторами, в числе которых можно отметить градиент удельного сопротивления исходного материала, деформации, несовмещение фотошаблона, определяющего геометрию прибора, и т.д.

Одной из причин изменения остаточного напряжения ($U_{ост}$) при отсутствии магнитного поля является чувствительность кремния к механическим напряжениям. Это ведет к появлению нежелательного выходного напряжения и проявляется как погрешность в регистрации ЭДС Холла.

Ощутимые погрешности возникают и вследствие изменения уровней деформаций при осуществлении контакта с пластиной, при резке пластины и разделении ее на кристаллы, при корпусировании, а также при эксплуатации изделия. Изменения в уровнях напряжений появляются, например, за счет различий в тепловых коэффициентах расширения кристалла и материала корпуса при повышении или понижении температуры окружающей среды.

Помимо этого кремний обладает сильно выраженным пьезорезистивным эффектом, и ЭХ, будучи четырехполюсником, реагирует на сдвиговые напряжения. И эта реакция тоже проявляется через указанный эффект. Влияние этого эффекта можно минимизировать, но нельзя исключить полностью, ориентируя соответствующим образом слиток кремния при резке его на пластины.

Определенные противоречия, возникающие при формировании элементов Холла совместно с другими элементами интегральных микросхем, разрешаются технологическими и схемотехническими методами. Из них наиболее известны такие, как использование симметричной топологии элемента Холла (обычно, представляющей квадрат) и применение нескольких элементов, соединенных и повернутых определенным образом. Варианты соединений интегральных ЭХ приведены на рис. 2.33.

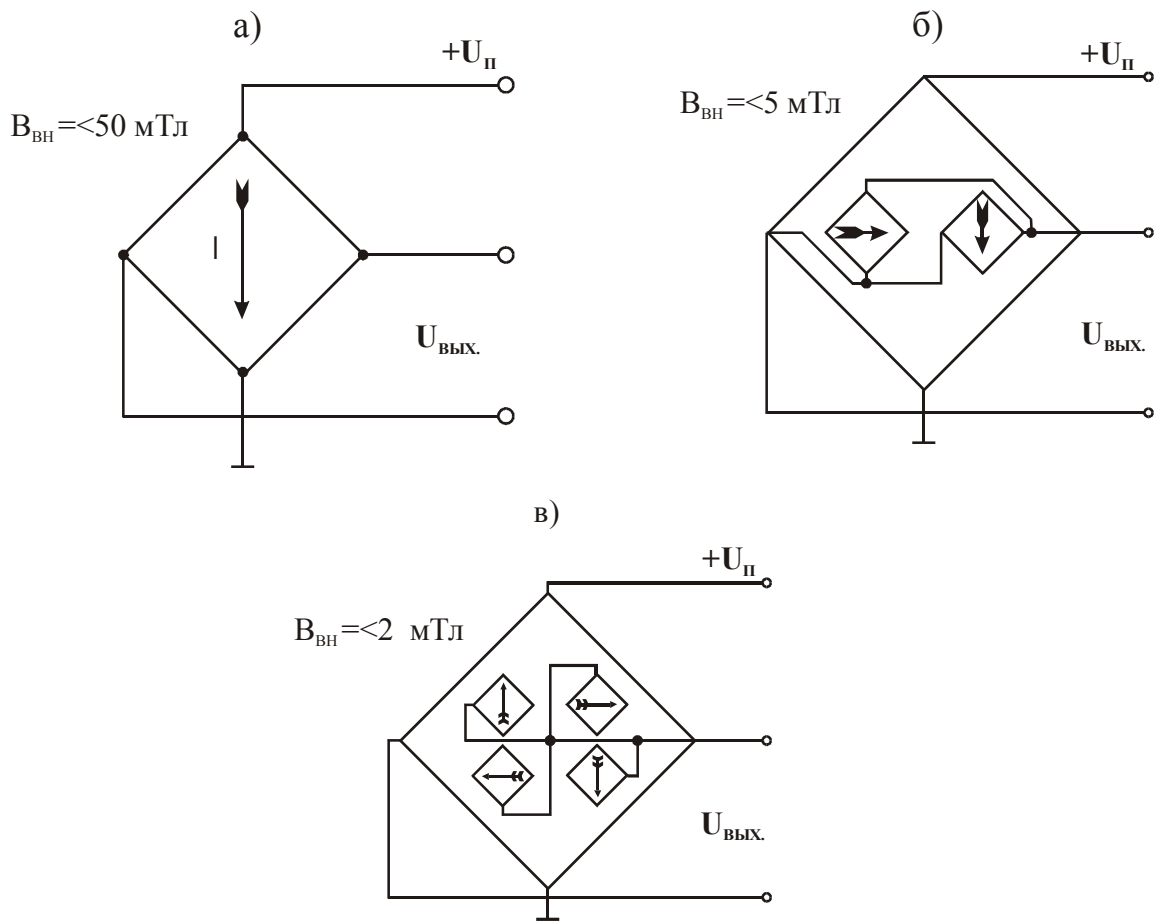


Рис. 2.33. Варианты соединения интегральных элементов Холла: а – симметричный единичный; б – двоянный; в – четверенный

Рассмотрим параллельное соединение элементов, развернутых относительно друг друга в одной приемной плоскости под углом 90° (так называемое «ортогональное смещение»). Подобным образом, можно соединить от двух до шестнадцати и более элементов.

Такое соединение широко используется при изготовлении магниточувствительных и магнитоуправляемых интегральных схем, так как в этом случае напряжение Холла (чувствительность) сохраняется (усредняется), а генерируемые ЭХ выходные сигналы, (включая пьезосопротивления или эффекты механических напряжений) компенсируются, что приводит к снижению величины остаточного напряжения и повышению термостабильности прибора.

Многосимметричные симметричные элементы Холла обладают явными преимуществами перед обычными конструкциями в том отношении, что их можно соединить таким образом, чтобы обеспечить максимальную компенсацию деформаций и сдвигов.

Дополнительные сведения см.: [4, 14, 15, 19, 36, 37, 46, 47, 48, 52, 56, 58, 61, 62, 63, 67, 69, 78, 85, 87, 88, 94, 101].

2.2. Магниторезисторы

Магниторезисторы – это электронные компоненты, действие которых основано на изменении электрического сопротивления полупроводника (или металла) при воздействии на него магнитного поля.

Механизм изменения сопротивления довольно сложен, так как является результатом одновременного действия большого числа разнообразных факторов. К тому же он не одинаков для разных типов приборов, технологии и материалов. Даже краткое описание принципа действия магниторезистора заняло бы слишком много места, поэтому ограничимся указанием соответствующей литературы [24, 30, 36, 45, 52, 67 и др.].

Магниторезисторы характеризуются такими параметрами, как чувствительность, номинальное сопротивление, рабочий ток, термостабильность и быстродействие, диапазон рабочих температур.

Определения основных параметров и специфические термины, используемые для оценки качества магниторезисторов, приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7. Специфические термины и определения основных параметров магниторезисторов

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение (альтернативное обозначение)	Единица измерения	Определение
Начальное сопротивление магниторезистора	R_o	Ом	Сопротивление магниторезистора при отсутствии магнитного поля. Нормируется для нормальной температуры окружающей среды $20 \pm 5^\circ\text{C}$ при $B=0$.
Сопротивление магниторезистора при воздействии управляющего магнитного поля.	R_B	Ом	Сопротивление магниторезистора при воздействии магнитного поля. Нормируется для нормальной температуры окружающей среды $20 \pm 5^\circ\text{C}$.
Коэффициент симметрии плеч дифференциального магниторезистора	M	%	Коэффициент, определяющий неравенство плеч дифференциального магниторезистора: $M = [(R_1 - R_2) / R_1] \times 100$ (при $R_1 > R_2$) Где R_1 и R_2 сопротивления плеч дифференциального магниторезистора
Магниторезистивное отношение	R_B/R_o	о.е.	Отношение сопротивления магниторезистора R_B при определенном значении магнитной индукции к его начальному сопротивлению R_o . Нормируется при определенном значении индукции управляющего магнитного поля.
Относительная магнитная чувствительность	γ	о.е.	Относительное изменение сопротивления магниторезистора, вызванное магнитным полем определенной индукции, и выражаемая следующим отношением: $\gamma = (R_B - R_o) * 100 / R_o$
Температурный коэффициент сопротивления магниторезистора	TK_R (TC_R) (TC_{R0})	%/град. %/K %/°C	Коэффициент, определяемый как: $TK_R = (100 \times \Delta R_o) / (R_o(T_o) \times \Delta T)$ Где ΔR_o - изменение сопротивления магниторезистора; ΔT - изменение температуры.
Температурный коэффициент магнитной чувствительности	γ_T ($TC_{\Delta R/R0}$)	%/град. %/K %/°C	Коэффициент, определяемый как: $\gamma_T = (100 \times \Delta \gamma) / (\gamma_o \times \Delta T)$ Где $\Delta \gamma$ - изменение сопротивления магниторезистора, ΔT - изменение температуры.

В России и за рубежом выпускается широкая номенклатура магниторезисторов, отличающихся типом конструкции и технологией изготовления магниточувствительного элемента и магнитной цепи. Особенно разнообразен ассортимент зарубежных магниторезисторов.

В этой главе рассматриваются конструкции некоторых типов отечественных магниторезисторов. Конструкция и параметры аналогичных зарубежных приборов мало чем отличаются от характеристик отечественных.

Выделяются две большие группы магниторезисторов, которые условно можно разделить на «монолитные» и «пленочные».

2.2.1. «Монолитные» магниторезисторы

Действие «монолитных» магниторезисторов основано на эффекте Гаусса, который характеризуется возрастанием сопротивления проводника (или полупроводника) при помещении его в магнитное поле.

Конструкция «монолитного» магниторезистора приведена на рис. 2.34.

Магниторезистор представляет собой подложку с размещенным на ней магниточувствительным элементом (МЧЭ). Подложка обеспечивает механическую прочность прибора. Элемент приклеен к подложке и защищен снаружи слоем лака. МЧЭ может размещаться в оригинальном или стандартном корпусе и снабжаться ферритовым концентратором магнитного поля, или «смещающим» постоянным микромагнитом.

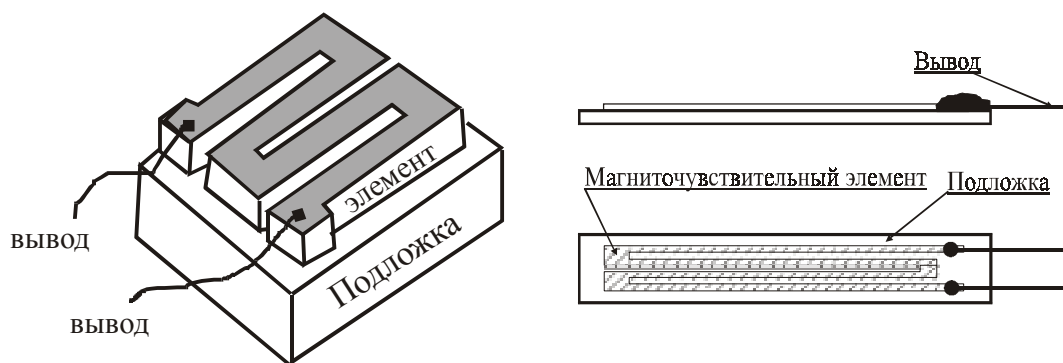


Рис. 2.34. Конструкции «монолитного» магниторезисторов

«Монолитные» магниточувствительные элементы изготавливаются из полупроводниковых материалов, обладающих высокой подвижностью носителей заряда. К таким материалам относятся антимонид индия (InSb) и его соединения, арсенид индия (InAs) и др.

В зависимости от назначения прибора МЧЭ могут иметь различную форму. Наиболее известны МЧЭ прямоугольной формы и имеющие вид меандра (рис. 2.35а; 2.35б; 2.35в).

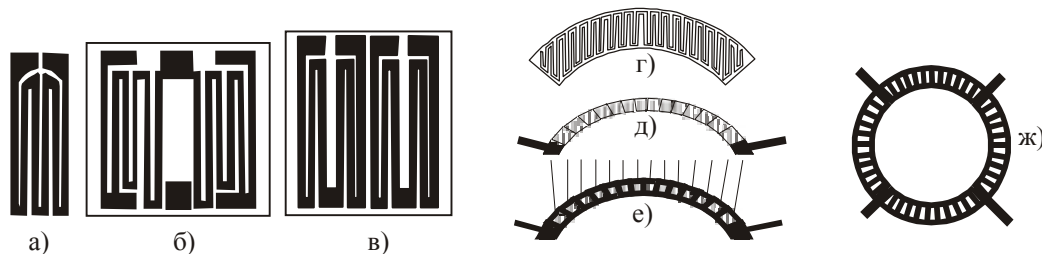


Рис. 2.35. Варианты топологии МЧЭ «монолитных» магниторезисторов

Элементы, показанные на рис. 2.35.г,д,е, предназначены для использования в магнитоуправляемых устройствах с круговым перемещением источника магнитной индукции. Магниточувствительный элемент, изображенный на рис. 2.35ж, представляет собой круговой магниторезистивный мост.

Наибольшее распространение получил эвтектический сплав InSb—NiSb, легированный теллуром. В России этот сплав известен под названием СКИН.

В зарубежных приборах применяется аналогичный сплав, трех модификаций: L, D, N.

Типичная зависимость магниторезистивного отношения (R_B/R_0) МЧЭ, изготовленных из сплава InSb—NiSb, от индукции управляющего магнитного поля показана на рис. 2.36 [122, 123].

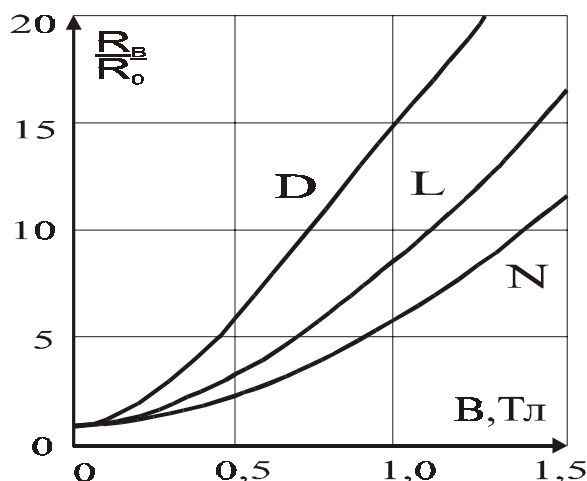


Рис. 2.36. Типичная зависимость МЧЭ, изготовленных из различных модификаций сплава InSb—NiSb, от величины индукции управляющего магнитного поля

Как следует из рис. 2.36, зависимость магнитной чувствительности «монолитного» МЧЭ в области слабых полей близка к квадратичной, а в области сильных полей — практически линейна. Область перехода от слабых полей к сильным для реальных магниторезистивных элементов лежит в пределах 0,2–0,4 Тл [30, 67, 106, 107].

Чувствительность магниторезистивного элемента изменяется и при изменении угла между вектором магнитной индукции и плоскостью элемента. Эта зависимость выражается формулой: [30]

$$(R_B \cdot R_0) / R_0 = [(R_B \cdot R_0) / R_0]_{\text{макс}} \times \{ \sin^2 \phi / [1 + (\mu_n \times B)^2 \times \cos^2 \phi] \} \quad (2.9)$$

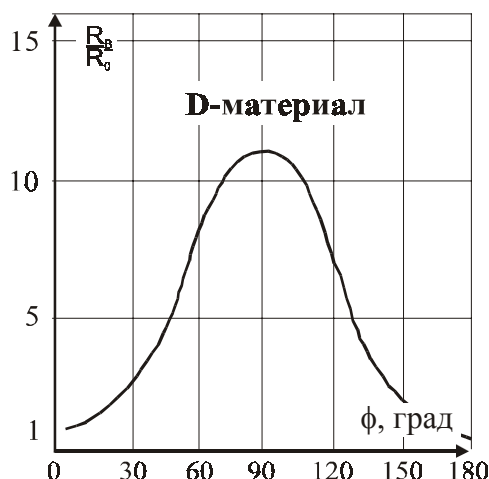
где R_B – сопротивление МЧЭ при воздействии магнитного поля ($B = B_{\text{ном}}$);

R_0 – сопротивление МЧЭ при отсутствии магнитного поля ($B = 0$);

ϕ – угол между векторами напряженности электрического и магнитного полей.

На рис. 2.37 приведена зависимость относительной чувствительности магниторезистора от угла ϕ . В «монолитных» МЧЭ, как правило, вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости чувствительного элемента. Поэтому максимальная чувствительность «монолитного» МЧЭ достигается при нормально падающем магнитном потоке ($\phi = 90^\circ$).

Рис. 2.37. Зависимость относительного изменения сопротивления «монолитного» МЧЭ от угла между вектором магнитной индукции и плоскостью магниторезистивного элемента, изготовленного из сплава InSb–NiSb



При использовании концентраторов и других элементов магнитных систем зависимость (2.9) может быть иной [67].

Сопротивление и чувствительность магниторезисторов зависят от температуры. На рис. 2.38 приведены типичные зависимости параметров магниторезисторов на основе InSb–NiSb от температуры окружающей среды и магнитной индукции.

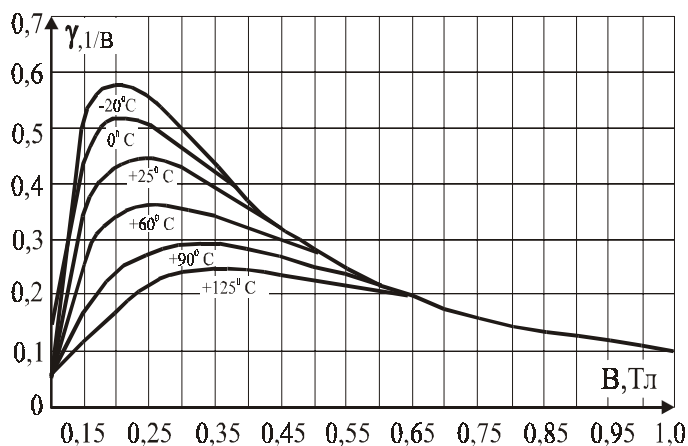


Рис. 2.38. Характерная зависимость магнитной чувствительности МЧЭ, изготовленного из сплава InSb–NiSb, от индукции управляющего магнитного поля при различной температуре

Производство и образцы «монолитных» магниторезисторов

Разработкой «монолитных» магниторезисторов в СССР занималось множество организаций, в их числе НИИ ГИРИКОНД (г. Ленинград), ОКБ ПО «Гиперон» (г. Москва), ВНИИ Чермет (г. Москва) и др.

Однако серийное производство было освоено только ПМЗР ПО «Гиперон».

Основные параметры, внешний вид и характеристики некоторых типов отечественных «монолитных» магниторезисторов приведены в главе 10.

Все отечественные «монолитные» магниторезисторы изготавливались по одинаковой технологии и имели типовую конструкцию.

Магниточувствительные элементы отечественных магниторезисторов изготовлены из эвтектического сплава InSb–NiSb. Они имеют форму меандра с шириной дорожки 100 мкм, при толщине элемента 50–100 мкм. МЧЭ установлены на основании из слюды, пермендюра или пермаллоя. Выводы – гибкие, проволочные, припаяны к контактным площадкам. Весь пакет покрыт слоем защитного лака. Максимальная толщина магниторезистора не превышает 0,8 мм.

Наиболее известным и распространенным отечественным магниторезистором является СМ4-1. Конструкция магниторезистора приведена на рис. 2.39.

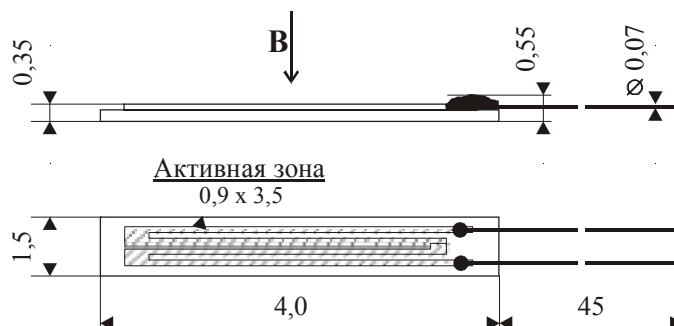


Рис. 2.39. Внешний вид и габариты магниторезисторов СМ4-1

Зависимость магниторезистора СМ4-1 от магнитной индукции в диапазоне индукций от 0 до 0,3 Тл квадратичная, а при индукции более 0,3 Тл – линейная [8, 29, 43].

Температурный коэффициент сопротивления магниторезисторов типа СМ4-1 при температурах от -60 до $+85$ °С без воздействия магнитного поля составляет не более 0,15 и 0,55% на градус Цельсия соответственно.

Магниторезисторы СМ4-1 устойчиво работают в интервале рабочих температур от -60 до $+85$ °С; при резкой смене температур (от -60 до $+85$ °С); относительной влажности воздуха до 98% при температуре 35 °С; атмосферном давлении от 10^{-4} до 10^{-5} Па; повышенном давлении воздуха (до $3 \cdot 10^5$ Па); в среде, зараженной плесневыми грибами, и в инее с последующим оттаиванием. Они выдерживают вибрацию в диапазоне частот от 1 до 5000 Гц с ускорением до 40 g; многократные удары с ускорением до 150 g и; одиночные с ускорением до 1000 g; линейные нагрузки с ускорением до 150 g; акустические шумы в диапазоне частот от 50 до 10000 Гц с уровнем звукового давления до 150 дБ [43].

За рубежом разработкой и серийным производством «монолитных» магниторезисторов занимаются десятки фирм. Наиболее известными являются: Siemens Aktiengesellschaft, Robert Boch (Германия); Philips Elec. (Голландия); RTC (Франция); Matsushita, Hitachi, Copal Co., Teikoki Tsushin Kogyo Co., Teitsu Denshi Kenkyusho Co., Panasonic, Sony, Rohm Co.Ltd.(все Япония); Samsung (Южная Корея); и др.

Обобщенные параметры «монолитных» магниторезисторов, изготавливаемых на основе сплава InSb–NiSb, приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8. Обобщенные параметры «монолитных» магниторезисторов на основе сплава InSb–NiSb

Размер чувствительной зоны, мм	Начальное сопротивление при 20 °С, Ом	Относительное изменение сопротивления при $B=1$ Тл, о.е.	Температурный коэффициент сопротивления, %/градус при $B=0$ Тл	Температурный коэффициент сопротивления, %/градус при $B=1$ Тл	Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, P_{max} Вт	Диапазон рабочих температур, °С
От 0,9x3,6	22...700	5...15	От +0,02	От -0,13	От 0,005	-60...+110
До 2,7x1,2			До -2,0	До -2,9	До 0,7	

Особенностью зарубежных элементов Холла является то, что, как правило, большая часть этих приборов ориентирована на решение конкретных технических задач, например: для регистрации магнитного потока, использования в качестве датчиков скорости вращения зубчатых колес и датчиков линейного перемещения и т.д. Поэтому, эти приборы отличаются конструктивным исполнением и особенностями применения.

В качестве примера рассмотрим некоторые типы «монолитных» магниторезисторов, выпускаемых фирмой Siemens:

Магниторезисторы FP 30N 60E, FP 30L 100E, FP 30D 250E, FP 110D 155, FP 110L 60 – бескорпусные, размещены на пермаллоевой подложке, выводы проволочные, толщина приборов 0,4 мм.

Магниторезисторы типа FP 17L 200J, FP 30L 100J также бескорпусные, но они размещены на гибком носителе, толщина приборов 0,35 мм.

Дифференциальные магниторезисторы типа FP 210L 100-22, FP 210D 250-22, FP 212L 100-22, FP 212D 250-22 выполнены на ферритовой подложке, снабжены постоянным магнитом и размещаются в пластмассовых корпусах.

Магниторезисторы типа FP 412L 100, FP 412D 250, FP 414L 300, FP 410Lg80FM выполнены на ферритовой подложке и размещаются в корпусе Micropack. При этом FP 410Lg80FM имеет сдвоенный дифференциальный магниточувствительный элемент [106, 107].

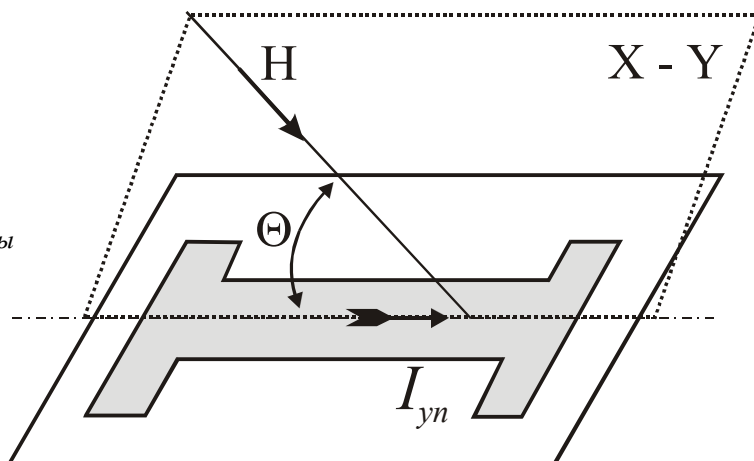
2.2.2. «Пленочные» магниторезисторы

«Пленочные» магниторезисторы получили распространение лишь в последние годы. Магниточувствительный элемент таких приборов изготовлен из ферромагнитных пленок (ФМП), использующих анизотропный магниторезистивный эффект. Максимальное значение магнитосопротивления «тонкопленочных» магниторезисторов соответствует нулевому внешнему магнитному полю, то есть при воздействии магнитного поля сопротивление такого МЧЭ уменьшается [28, 32, 33, 99, 111].

Конструкция магниторезисторов из ФМП не отличается от конструкций других разновидностей магниторезисторов, за исключением того, что МЧЭ изготовлен по специальной тонкопленочной технологии. Напыление магниточувствительного слоя, как правило, происходит при воздействии магнитного поля.

Для создания МЧЭ используют тонкие одно- и многослойные пленки никель-кобальтовых (Ni-Co), никель-железных (Ni-Fe) и других сплавов. В качестве подложек применяют стекло, ситалл или кремний, обладающие большой теплопроводностью и коэффициент термического расширения которых, близок по величине к ТКР используемых пленок.

Рис. 2.40. К пониманию принципа работы тонкопленочного магниторезистора



Для тонкопленочных магниторезисторов на основе ФМП (см. рис. 2.40) анизотропное электрическое сопротивление r материала МЧЭ в зависимости от угла Θ между направлением электрического тока через МЧЭ (I) и направлением управляющего магнитного поля (H) постоянной величины выражается следующей формулой (Фойгта–Томпсона):

$$r = r(\Theta) = r_0 \times \sin^2 \Theta + r_{90} \times \sin^2 \Theta \quad (2.10)$$

где r_{90} – удельное электрическое сопротивление материала МЧЭ при $\Theta = 90^\circ$;

r_0 – удельное электрическое сопротивление материала МЧЭ при $\Theta = 0^\circ$.

На рис. 2.41а приведен график зависимости сопротивления МЧЭ от угла падения магнитного потока, соответствующий формуле (2.10).

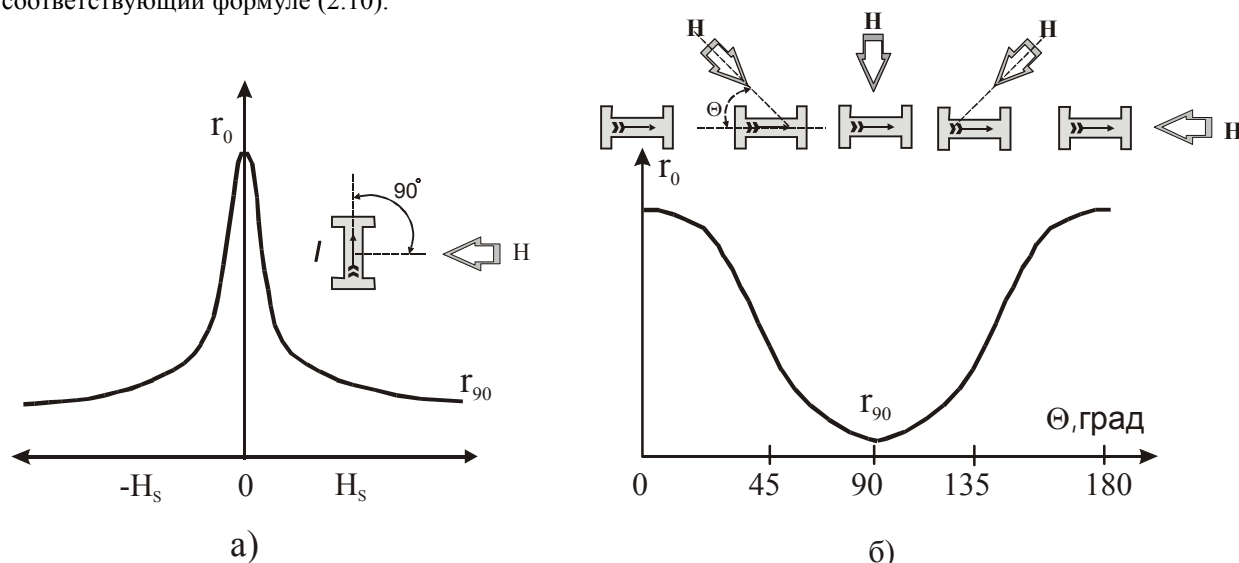


Рис. 2.41. Зависимость сопротивления (r) тонкопленочного магниточувствительного элемента : а – от напряженности (H) магнитного поля; б – от угла падения (Θ) магнитного потока

В верхней части рис. 2.41.б рассмотрено пять случаев ориентации магнитного поля H относительно направления тока (I) в МЧЭ, соответствующих пяти характерным точкам графика зависимости r от Q (три точки экстремумов и две точки перегибов). Из рис. 2.41.а видно, что сопротивление МЧЭ имеет максимальное значение при совпадении направлений тока (I) и магнитного поля H ($Q = 0$) и при угле Q , равном 90° .

Магнитная чувствительность «тонкопленочных» МЧЭ определяется параметрами материала. В табл. 2.9 приведены основные характеристики некоторых материалов, используемых зарубежными производителями для изготовления тонкопленочных магниторезисторов.

Таблица 2.9. Основные характеристики некоторых материалов, используемых зарубежными производителями для изготовления тонкопленочных магниторезисторов

Материал пленки	Удельное сопротивление, ρ , $1 \cdot 10^{-8}$, Ом * м	Относительное изменение сопротивления при $B=1$ Тл, о.е.
Ni ₍₈₁₎ Fe ₍₁₉₎	22	2,2
Ni ₍₈₆₎ Fe ₍₁₄₎	15	3
Ni ₍₅₀₎ Co ₍₅₀₎	24	2,2
Ni ₍₇₀₎ Co ₍₃₀₎	26	3,7

На рис. 2.41.б приведен график зависимости сопротивления r от напряженности управляющего магнитного поля H , построенный при воздействии поля согласно схеме, показанной в правом верхнем углу рис. 2.41.а ($\Theta = 90^\circ$). Из этой зависимости следует, что максимальное значение r , равное r_0 , соответствует нулевому внешнему магнитному полю. Данная зависимость имеет участки насыщения, соответствующие магнитным полям $H > H_s$, в пределах которых удельное сопротивление МЧЭ изменяется относительно мало.

Величина напряженности магнитного поля насыщения H_s определяется по формуле:

$$H_s = \kappa \times \left(\frac{t}{w} \right) + H_k \quad (2.11)$$

где κ – постоянный коэффициент;

t – толщина магниточувствительного элемента;

w – ширина магниточувствительного элемента.

Значение κ зависит от материала МЧЭ. Это значение выше для МЧЭ из пленок Ni-Co по сравнению с МЧЭ из пленок Ni-Fe [34, 110].

Производство и образцы тонкопленочных магниторезисторов

Разработкой тонкопленочных магниторезисторов в СССР занимались такие организации, как НИИ ГИРИКОНД (г. Ленинград), ОКБ и завод «Альфа» (г. Рига), ОКБ ПО «Гиперон» (г. Москва), ВНИИ Чермет (г. Москва), ВНИИЭП (г. Ленинград) и др.,

Однако серийное производство тонкопленочных магниторезисторов не осуществлялось. Лишь в ОКБ ПО, «Гиперон» (г. Москва) были разработаны и выпускались ограниченными партиями тонкопленочные магниторезисторы типа Ав-1 и Ав-2. По своим параметрам и характеристикам указанные приборы полностью соответствуют зарубежным аналогам, выпускаемым, например, фирмой Panasonic (Япония). На рис. 2.42 приведен внешний вид тонкопленочных магниторезисторов Ав-1 и Ав-2 отечественного производства.

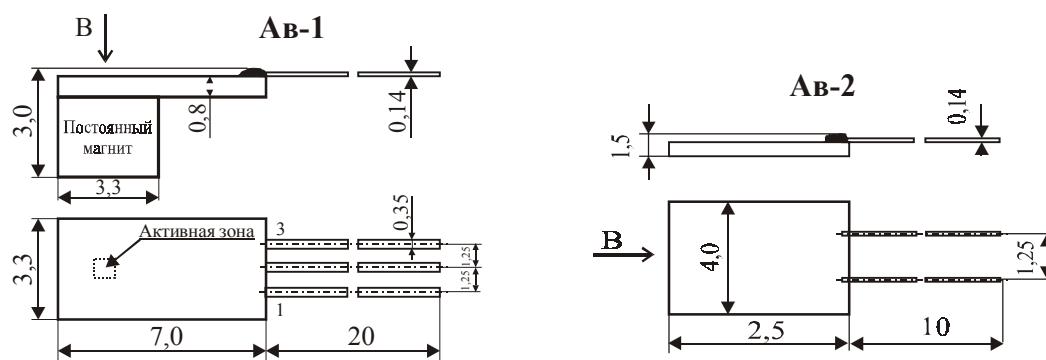


Рис. 2.42. Внешний вид и габариты магниторезисторов Ав-1 и Ав-2

Подложкой для обоих приборов служит полированное стекло толщиной 0,8 мм. Магниточувствительный элемент магниторезистора Ав-1 выполнен из сплава никель-кобальт в виде меандра с шириной 10 мкм, толщиной до 3000 ангстрем. МЧЭ магниторезистора Ав-2 выполнен из сплава никель-железо в виде меандра с шириной 20 мкм, толщиной до 1000 А. Для смещения энергетической характеристики магниторезистор Ав-1 снабжен активным концентратором, представляющим собой миниатюрный постоянный магнит из феррита бария.

Кроме того, магниторезистор Ав-1 содержит два магниточувствительных элемента, включенных последовательно с отводом от середины (так называемый. «полумост»), что позволяет включать прибор непосредственно в схему моста в качестве дифференциального элемента.

Основным параметром магниторезисторов на основе «пленочных» МЧЭ является относительная магнитная чувствительность (γ), измеряемая при малых значениях магнитной индукции (до 20–50 мТл), и составляющая от 1,5 до 5%.

Тонкопленочные магниторезисторы Ав-1 и Ав-2 обладают повышенной чувствительностью к слабым магнитным полям. Участок насыщения характеристики магниторезисторов начинается при индукции внешнего магнитного поля, превышающей 30–40 мТл для Ав-1 и 15–20 мТл для Ав-2. Эта особенность данных характеристик позволяет применять указанные магниторезисторы для точных измерений физических величин при использовании внешних магнитных полей, модулируемых измеряемыми физическими величинами, изменяющимися в пределах от 0 до 20 мТл.

Температурный коэффициент сопротивления для приведенных типов магниторезисторов составляет 0,25–0,36% на градус Цельсия, что более чем в два раза меньше температурного коэффициента сопротивления приборов на основе «монокристаллических» МЧЭ [8].

Всероссийским научно-исследовательским институтом электроизмерительных приборов (г. Ленинград) разработан тонкопленочный магниторезистор, состоящий из четырех однотипных МЧЭ, образующих равновесный и равноплечный мост. Конструктивно магниторезистор выполнен в виде четырехвыводной микросборки, состоящей из керамической платы с напыленными МЧЭ и выводов, расположенных на одной из сторон платы. Вся сборка герметизирована эпоксидным компаундом [1].

Основные параметры и характеристики тонкопленочных магниторезисторов отечественного производства приведены в главе 10.

Серийным производством тонкопленочных магниторезисторов занимаются десятки зарубежных фирм. Среди них наиболее известны фирмы: Matsushita, Hitachi, Copal Co., Teikoki Tsushin Kogyo Co., Teitsu Denshi Kenkyusho Co., Panasonic, Sony, Rohm Co. Ltd. (все Япония); Robert Boch, Siemens Aktiengesellschaft (Германия); Samsung (Южная Корея); Philips Elec. (Голландия); RTC (Франция), Honeywell, Nonvolatile Electronics Inc. (США) и др.

Суммарный годовой объем выпуска магниторезисторов зарубежными фирмами составляет сотни миллионов изделий достаточно широкой номенклатуры.

Наибольшую известность получили тонкопленочные магниторезисторы серии KMZ10 (KMZ10A, KMZ10B, KMZ10C), выпуск которых освоен такими зарубежными фирмами, как Siemens, Valvo, RTC, Panasonic и др. Этот магниторезистор обладает высоким уровнем основных параметров и характеристик, поэтому может рассматриваться в качестве примера технического уровня зарубежных тонкопленочных магниторезисторов.

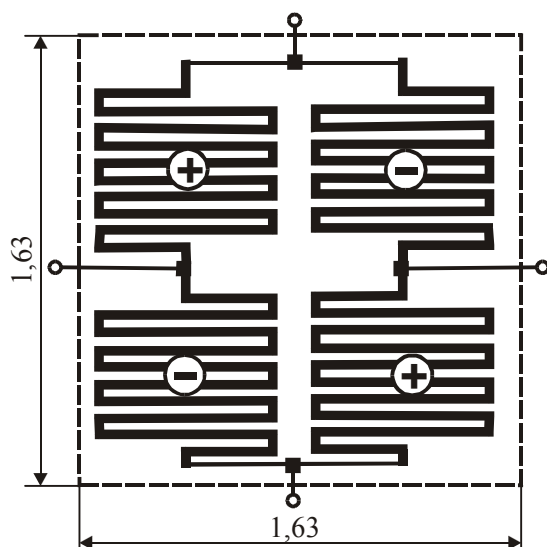


Рис. 2.43. Конструкция магниточувствительного элемента магниторезистора серии KMZ10

Магниторезистор серии KMZ10 представляет собой кремниевую подложку размером 1,6x1,63 мм (рис. 2.43) с напыленными на ней четырьмя резисторами из пермаллоя (Ni-Co), соединенными в схему моста. Вся конструкция размещается в стандартном 4-х выводном пластмассовом корпусе с максимальными габаритами 4,8x5,2x1,85 мм. Основные параметры и характеристики мостов приведены в главе 10.

В последние годы была разработана новая технология изготовления тонкопленочных магниторезисторов. Приборы, изготовленные по такой технологии, получили название GMR (Giant Magneto Resistor) – «гигантских» магниторезисторов.

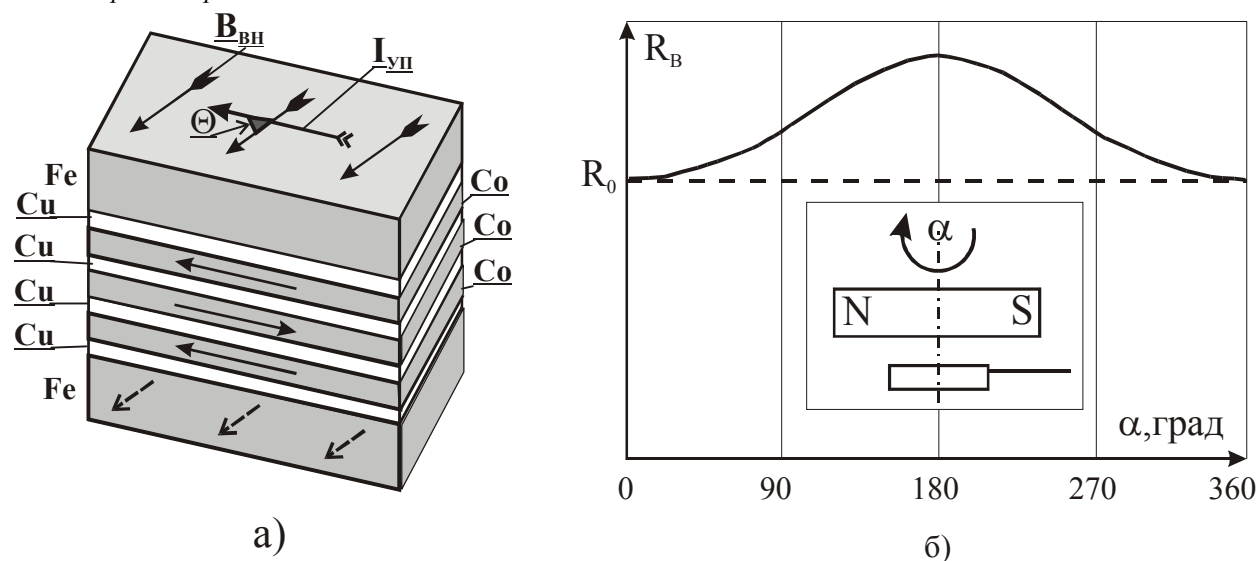


Рис. 2.44. GMR магниточувствительный элемент: а – структура; б – ориентационная характеристика

Магниточувствительные элементы GMR резисторов представляют собой многослойные тонкопленочные структуры с субмикронной шириной. Пример такой структуры приведен на рис. 2.44.а. На рис. 2.44.б дана ориентационная характеристика GMR магниточувствительного элемента. Подробнее см. [66, 68, 93, 83].

Фирмой Siemens и другими. зарубежными производителями освоен выпуск высокочувствительных тонкопленочных магниторезисторов серии GMR.

Магниторезисторы серии GMR размещены в стандартных микроминиатюрных пластмассовых корпусах типа SOH, SMT, MW-6. Габариты магниторезисторов GMR S4 – 3,2х 2,3 х 0,7 мм, остальных (GMR S6, GMR B6, GMR C6) – 2,9 х 1,3 х 1,1 мм. Диапазон рабочих температур всех магниторезисторов составляет от –40 до +150 °С.

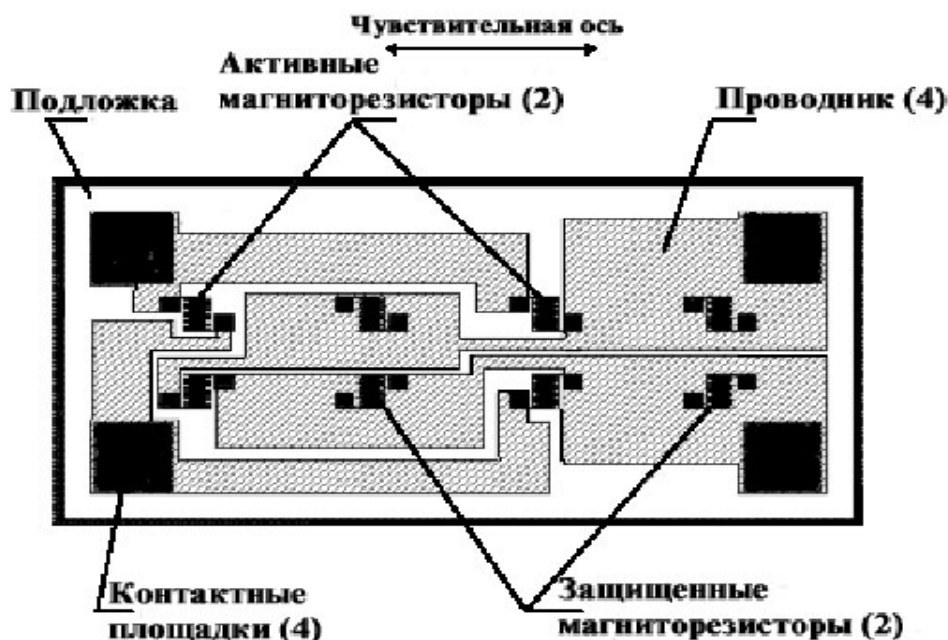


Рис. 2.45. Топология магниторезисторного моста серии ААххх, выпускаемого фирмой NVE

Аналогичные приборы выпускаются фирмами Honeywell, Nonvolatile Electronics Inc. и другими зарубежными производителями. На рис. 2.45 приведена топология тонкопленочного магниторезисторного моста серии ААххх, выпускаемого фирмой NVE. Некоторые характеристики магниторезисторных мостов серии ААххх приведены на рис. 2.46.

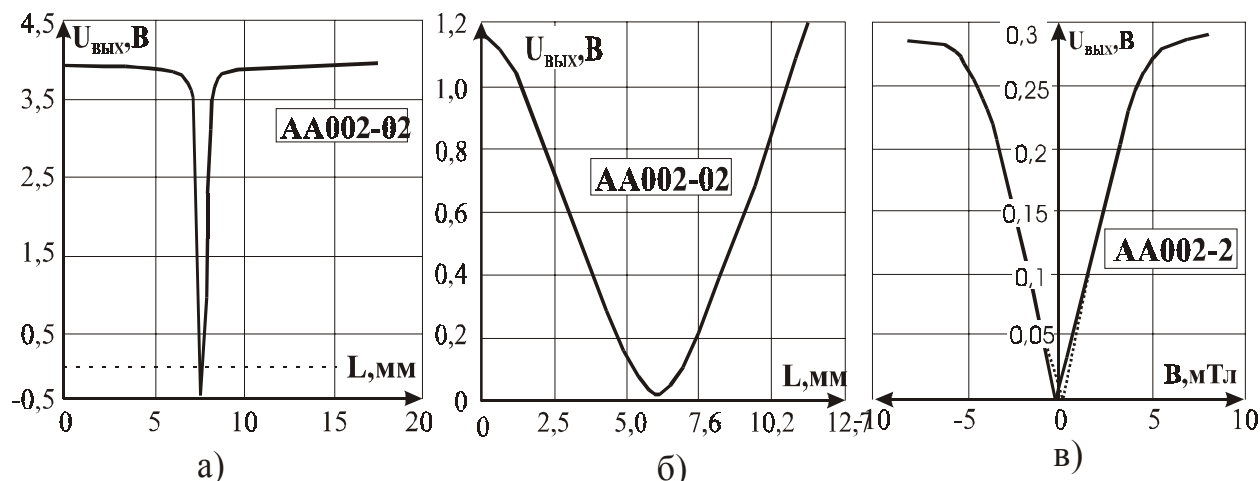


Рис. 2.46. Типичные зависимости напряжения на выходе магниторезисторных мостов серии ААххх-2: а – от расстояния при перемещении вдоль источника магнитного поля; б – поперек «чувствительной» оси; в – от индукции воздействующего магнитного поля

Следует отметить, что уровень шума типа «1/f» для GMR магниторезисторов примерно на порядок выше, чем у тонкопленочных резисторов. Уровень таких шумов пропорционален квадрату тока, протекающего через прибор [83].

Из других новых разработок тонкопленочных магниторезисторов можно отметить серию приборов типа TMS-205-001, созданных фирмой TDK Corp., предназначенных для регистрации магнитного поля Земли в устройствах автоматической коррекции цветовых aberrаций и искажений в дисплеях, вызванных земным магнетизмом. Длина магниточувствительного элемента TMS-205-001 доведена до 16 мм. Общие размеры прибора, включая схему усиления и управления, составляют 30x23,5x9 мм. В приборе использован один магниточувствительный элемент для осей X и Y с чувствительностью до 50 мВ/мТл.

Основные параметры и характеристики магниторезисторов, выпускаемых ведущими производителями, приведены в главе 10 тома 2.

2.2.3. Частотные характеристики магниторезисторов

Магниторезисторы и устройства на их основе могут работать при постоянном и модулированном (переменном) магнитном поле. Однако при частоте более 10 кГц возникает фазовый сдвиг, а при частоте более 1 МГц происходит изменение проводимости резистора. Частотные характеристики магниторезисторов с «монолитным» МЧЭ приведены на рис. 2.47 [45].

Верхняя частота АЧХ тонкопленочных магниторезисторов составляет более 1 МГц.

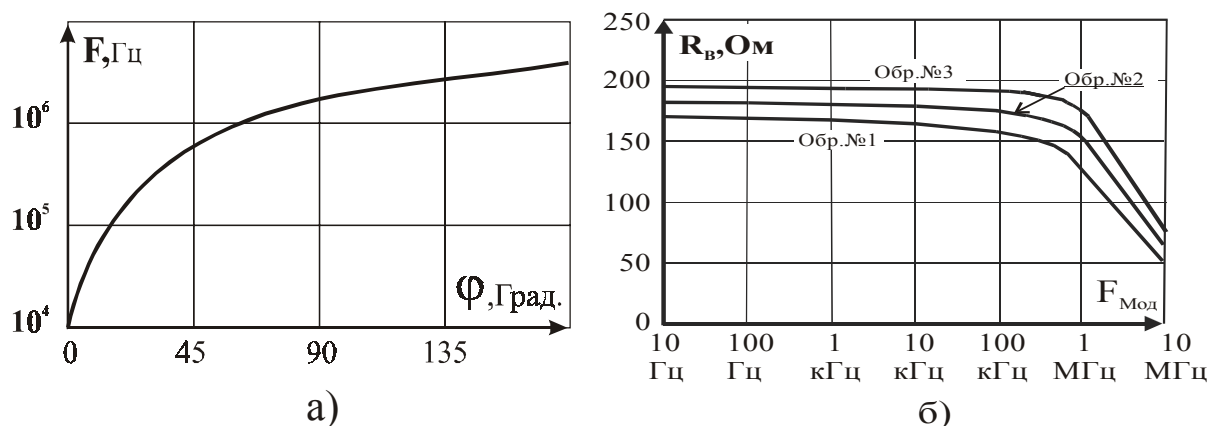


Рис. 2.47. Характеристики «монолитного» магниторезистора: а – фазовая; б – частотная

Экспериментально доказано, что магниторезисторы могут работать при частоте модуляции магнитного потока до 1 ГГц [45, 67].

При использовании магниторезисторов в высокочастотной аппаратуре следует учитывать некоторые их особенности.

Например, если магниточувствительных элементы наклеены на металлическую подложку, то возможно возникновение токов Фуко. Поэтому при использовании на высоких частотах модуляции магнитного потока следует выбирать магниторезистор с подложкой из феррита.

Необходимо учитывать и то, что паразитная ЭДС в высокочастотном магнитном поле может быть индуцирована и в МЧЭ, имеющем форму меандра, причем избежать этого не удастся даже при бифилярной форме меандра. Наиболее эффективно компенсировать возникающую паразитную ЭДС, в этом случае, можно путем организации петли из токоподводящих проводов, в которой будет индуцироваться противо-ЭДС.

Для уменьшения индукционного остаточного напряжения за счет уменьшения эквивалентной площади индукционного витка на выходе выводы «холловских» электродов за пределами МЧЭ должны скручиваться между собой. Однако, даже при самой тщательной укладке выводов значение A_L составляет 0,01–0,05 см², что при магнитной индукции 1 Тл и частоте 50 Гц дает значение остаточного напряжения U_L порядка 0,25–1,25 мВ [67].

2.2.4. Ориентационная характеристика магниторезистора

Ориентационная характеристика магниторезистора определяется диаграммой направленности.

В качестве примера на рис. 2.48 показано семейство диаграмм направленности «монолитного» магниторезистора, изготовленного из нелегированного антимида индия.

Следует учитывать, что при определении модулей вектора B точность измерения в значительной мере зависит от соотношения геометрических размеров, которое определяет форму диаграммы направленности.

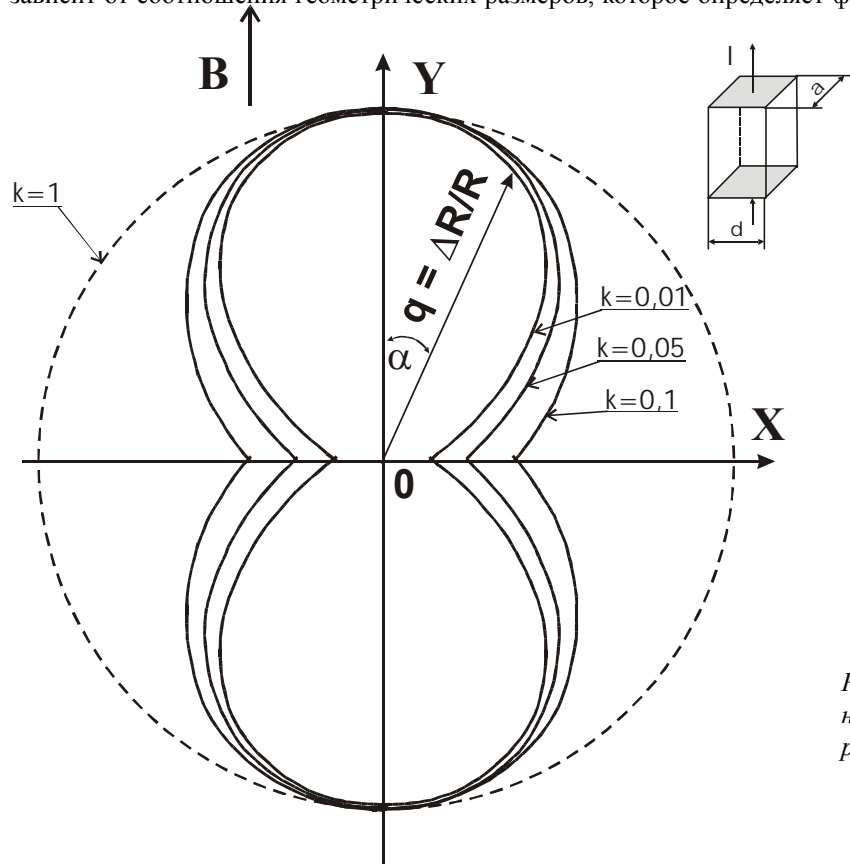


Рис. 2.48. Диаграмма направленности «монолитного» магниторезистора

Диаграммы определены при различных значениях отношения (k) толщины МЧЭ – a – к ширине – d . Как видно из рис. 2.48, при отношении $k = d/a = 1$ диаграмма вырождается в круг. Очевидно, в этом случае магниторезистор может быть использован только для измерения модуля B .

Из диаграммы, приведенной на рис. 2.48, следует, что использование «монолитных» магниторезисторов для ориентационной аппаратуры – это не лучший вариант.

По мнению автора работы [7], принципиально можно создать такой прибор на основе «монолитного» магниторезистора, который измерял бы и направление вектора B или его составляющих.

Для этого магниторезистор необходимо поместить во вспомогательное магнитное поле B_0 , направление которого известно; тогда знак приращения ΔR покажет на направление вектора B (или его соответствующей составляющей B_y) относительно B_0 . Однако реализовать конструкцию такого прибора на практике чрезвычайно сложно (в основном из-за необходимости создания малогабаритного источника сильного магнитного поля B_0). Что же касается метрологических характеристик, то такой прибор будет намного уступать аналогичным приборам, сконструированным на основе элементов Холла [81].

Создание высокочувствительных тонкопленочных магниторезисторов позволяет решить большинство проблем, возникающих при проектировании приборов для определения направления. В этом случае магниточувствительный элемент размещается внутри катушки смещения (микроэлектромагнита), формирующей вспомогательное магнитное поле. В главе 6 будут рассмотрены некоторые варианты подобных изделий.

2.2.5. Применение магниторезисторов

Магниторезисторы применяются в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках: скорости и направления вращения, угла поворота и положения, линейного перемещения, расхода жидкости и газа, электрического тока и напряжения и т.п.

Их используют в бесконтактной клавиатуре ПЭВМ, бесконтактных переменных резисторах, вентильных электродвигателях, электронных модуляторах и преобразователях, измерителях магнитного поля, металлоискателях, электронных навигаторах, в бытовой электронной аппаратуре, системах автоматического управления, устройствах считывания информации ЭВМ, определителях подлинности банкнот, электронных и электрифицированных игрушках и др.

Современная групповая технология ИС позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе тонкопленочных магниторезисторов, которые могут формироваться как в линейные, так и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом их организации.

Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей (лент, карт и т.п.).

Подробнее о способах организации многоканальных и многоэлементных магниточувствительных структур и, о возможных областях их применения см. в главах 4 и 6.

Особенности применения магниторезисторов

При использовании магниторезисторов необходимо учитывать их преимущества и недостатки.

Например, «монолитные» магниторезисторы целесообразно использовать для регистрации «сильных» магнитных полей (100–1000 мТл). При этом следует учитывать максимальное значение индукции управляющего магнитного поля ($B_{\text{макс}}$), при котором гарантируется заданная линейность преобразования, так как с ростом индукции управляющего поля, как правило, растет входное сопротивление магниточувствительного элемента. Поэтому необходимо следить за тем, чтобы при высоких индукциях (1 Тл и более) значение тока управления было выбрано таким, при котором температура элемента не будет превышать допустимую.

При использовании магниторезисторов необходимо учитывать его так называемую нагрузочную способность.

Этот параметр определяется тем предельным значением температуры перегрева прибора, который допускается и не выводит прибор из строя. Для большинства магниторезисторов значение этой температуры не превышает 150 °С. Обычно в паспорте на прибор указывается рабочий диапазон, в котором возможна его эксплуатация.

Нагрузочная способность магниторезистора указывается в документации на прибор в виде одного из следующих параметров:

- значения мощности, которую может рассеять магниторезистор $P_{\text{макс}}$;
- значения предельно допустимого тока $I_{\text{макс}}$;
- значения теплового сопротивления λ .

Рабочее напряжение для магниторезистора (U_n) рассчитывается по формуле:

$$U_n = \sqrt{(T_{\text{макс}} - T_A) \times \lambda \times R(T_{\text{макс}})} \quad (2.12)$$

где λ – теплопроводное сопротивление конструкции магниторезистора;

$T_{\text{макс}}, T_A$ – максимально допустимая температура прибора и температура окружающей среды;

$R(T_{\text{макс}})$ – сопротивление МЧЭ при максимальной температуре.

Из выражения (2.12) для каждого значения температуры окружающей среды можно определить допустимую нагрузку для конкретного типа магниторезистора, параметр I обычно определяется экспериментально изготовителем прибора в среде неподвижного воздуха. Значение I указывается в технической документации на магниторезистор.

Максимальную мощность $P_{\text{макс}}$ можно значительно повысить (в 1,5–2 раза), при использовании элементарного теплоотвода, если, например, магниторезистор с обеих сторон привести в плотное соприкосновение с металлическими полюсами магнитопровода.

Тонкопленочные магниторезисторы больше подходят для регистрации слабых магнитных полей (до 10–30 мТл), иногда близких к пороговым значениям. При этом следует помнить, что порог чувствительности определяется минимальным уровнем магнитного излучения, регистрируемым преобразователем магнитного поля при отношении сигнал/шум, равном единице. Порог чувствительности характеризуется многими параметрами МЧЭ: величиной остаточного напряжения, уровнем собственных шумов, величиной тока управления и т.д. Значение остаточного напряжения, зависит от направления и значения тока управления, от температуры элемента.

Температурное изменение чувствительности (выходного сигнала) магниторезисторов на основе ФМП при питании от источника постоянного тока составляет около $-0,04\%$ на градус Цельсия, что в 5–10 раз меньше, чем у «монокристаллических» магниторезисторов [30, 8].

Кроме того, при использовании в ограниченном динамическом диапазоне (до 10 мТл) тонкопленочные магниторезисторы выгодно отличаются от других преобразователей магнитного поля.

На рис. 2.49 приведены выходные характеристики различных преобразователей магнитного поля при одинаковом напряжении питания, равном 5 В [8].

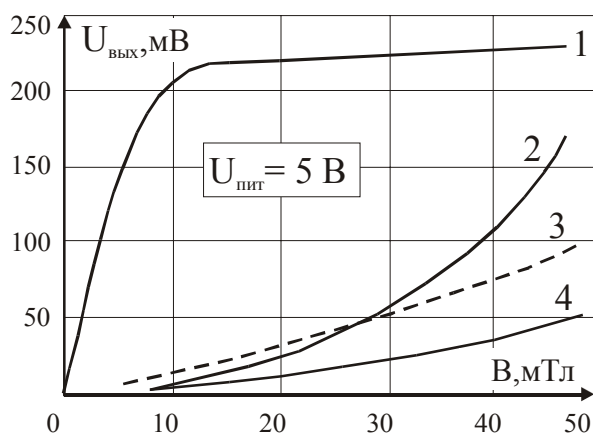


Рис. 2.49. Выходные характеристики различных ПМП: 1 – тонкопленочный магниторезистор; 2 – «монокристаллический» магниторезистор; 3 – элемент Холла на основе InSb; 4 – элемент Холла на основе GaAs

Из рис. 2.49 видно, что при магнитной индукции порядка 5 мТл, соответствующей линейным участкам всех приведенных характеристик, чувствительность тонкопленочных магниторезисторов, в 5 раз выше чувствительности других магниточувствительных приборов.

Схемы включения магниторезисторов

Схему включения магниторезистора выбирают исходя из конкретных условий применения и, как правило, индивидуально для каждого типа приборов. Схемы подключения магниторезисторов («монокристаллических» и тонкопленочных) к источнику питания и нагрузке приведены на рис. 2.50.а,б,в,г.

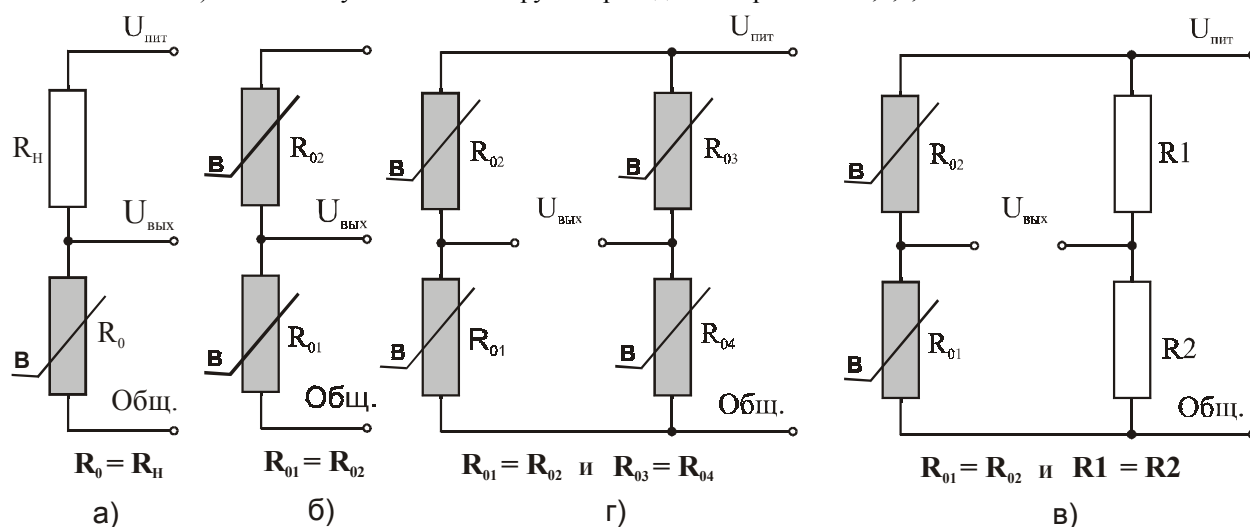


Рис. 2.50. Схемы подключения магниторезисторов к источнику питания и нагрузке: а – одиночный с R_H ; б – дифференциальный (полумост); в – дифференциальный в мостовую схему; г – магниторезисторный мост

Для компенсации термической нестабильности одиночного магниторезистора можно использовать специально подобранный (по ТКС) терморезистор, который включается вместо резистора нагрузки R_H (рис. 2.50.а).

Наилучшие результаты дает использование дифференциальных магниторезисторов (рис. 2.50б,в) и магниторезисторных мостов (рис. 2.50г).

Для усиления и первичной обработки сигнала, «снимаемого» с магниторезистора, могут использоваться различные электронные схемы, выполненные на транзисторах (рис. 2.51) или на интегральных микросхемах (рис. 2.52 и 2.53).

На рис. 2.51а приведена схема входного каскада магнитоэлектронного устройства, выполненного на магниторезисторе. При воздействии на магниторезистор R1 внешнего магнитного поля, сигнал на выходе цепочки R1—R2 изменяется пропорционально изменению напряженности магнитного поля и в пределах линейного участка входной характеристики транзистора VT1. Режим работы транзистора устанавливается резистором R2. В данной схеме используется транзистор с максимально возможным статическим коэффициентом передачи тока (более 200).

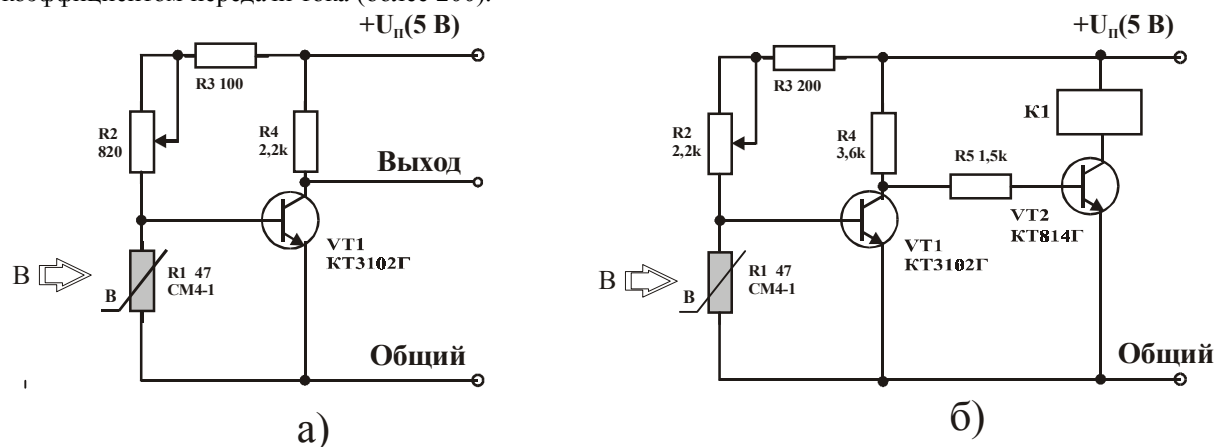


Рис. 2.51. Схемы включения магниторезистора в транзисторный каскад

Для усиления сигнала магниторезисторов при создании современных магнитоэлектронных устройств наиболее целесообразно применять ИС операционных усилителей, включаемых по схеме преобразователей типа «сопротивление—напряжение» (ПСН).

В составе высокочувствительных магнитоэлектронных устройств наиболее эффективно применение малошумящих интегральных инструментальных усилителей типа AMP-04 и AMP-01 (фирма Analog Devices) или INA118P (фирма Burr-Brown) [86, 97, 104].

Повышение термостабильности магнитоэлектронных устройств обеспечивается использованием специальных схем терморегулирования и питания от источника переменного тока.

На рис. 2.52.а в качестве примера приведены схемы питания и термостабилизации режима работы тонкопленочного магниторезистора типа GMR C6. При этом усиление сигнала может осуществляться усилителем, схема которого приведена на рис. 2.52.б. При величине резистора R6 = 5k, коэффициент усиления такой схемы составляет примерно 18.

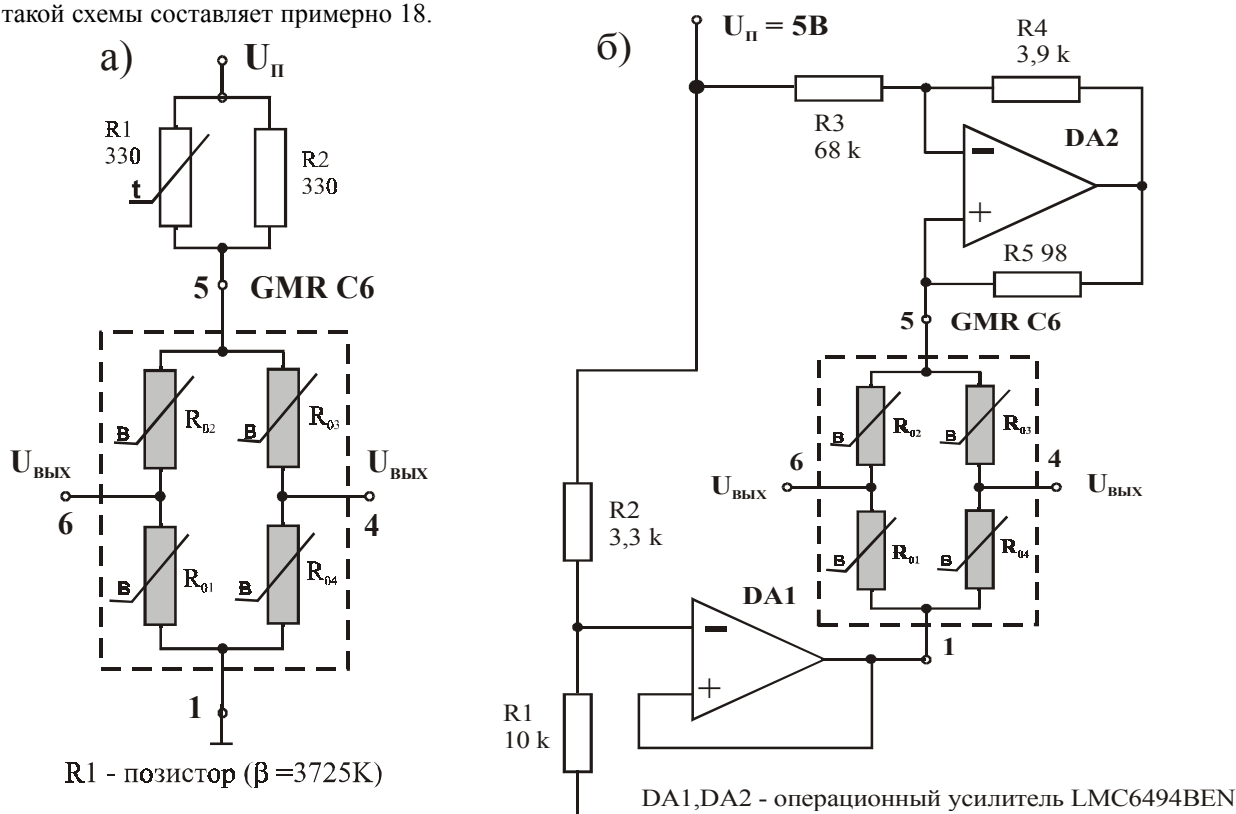
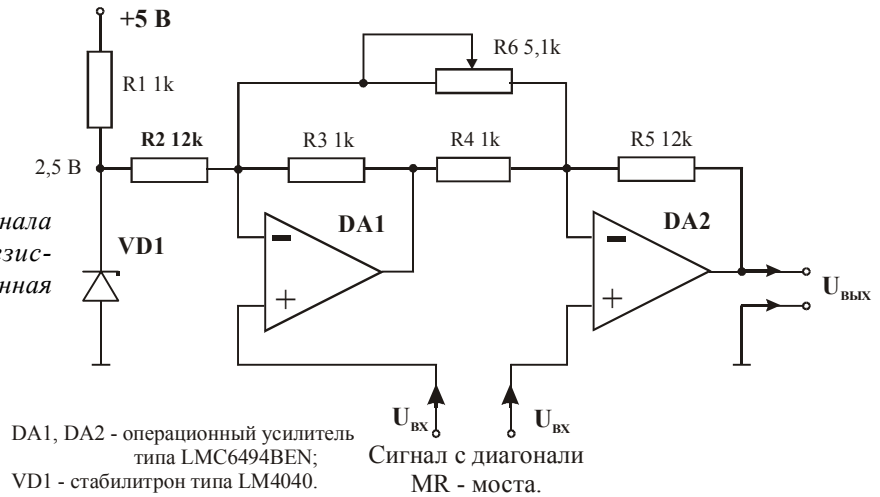


Рис. 2.52. Схемы питания и термостабилизации режима тонкопленочного магниторезистора типа GMR C6 с применением: а – позистора; б – усилителя сигнала [93]

На рис. 2.53 и 2.54 даны простейшие схемы подключения магниторезисторов к операционным и инструментальным усилителям.

Рис. 2.53. Схемы усиления сигнала тонкопленочного магниторезисторного моста, рекомендованная фирмой Siemens. [93]



На рис. 2.54 приведена схема включения дифференциального «монолитного» магниторезистора, предназначенная для работы в устройстве контроля скорости вращения зубчатого колеса [106, 107].

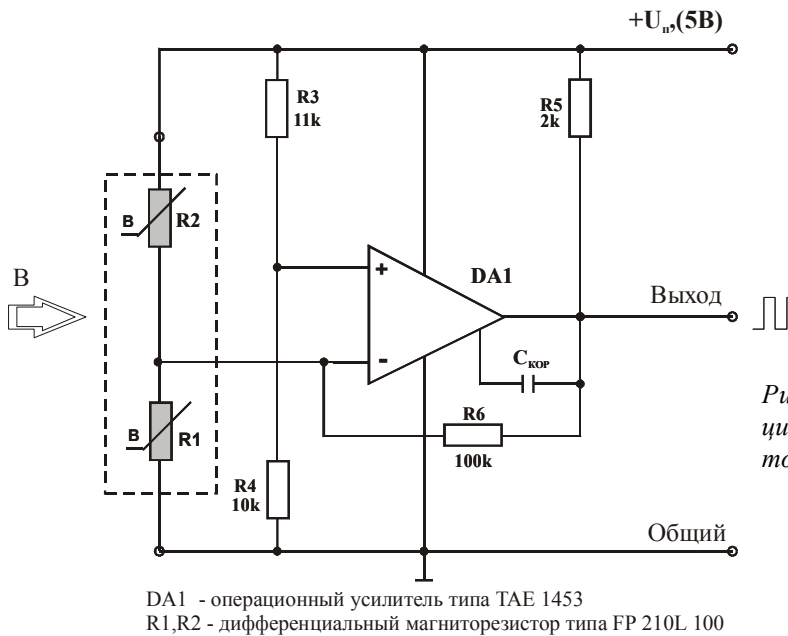


Рис. 2.54. Схема включения дифференциального «монолитного» магниторезистора, рекомендованная фирмой Siemens

На рис. 2.55 дана схема включения тонкопленочного магниторезистора типа KMZ10, предназначенная для регистрации слабых магнитных полей.

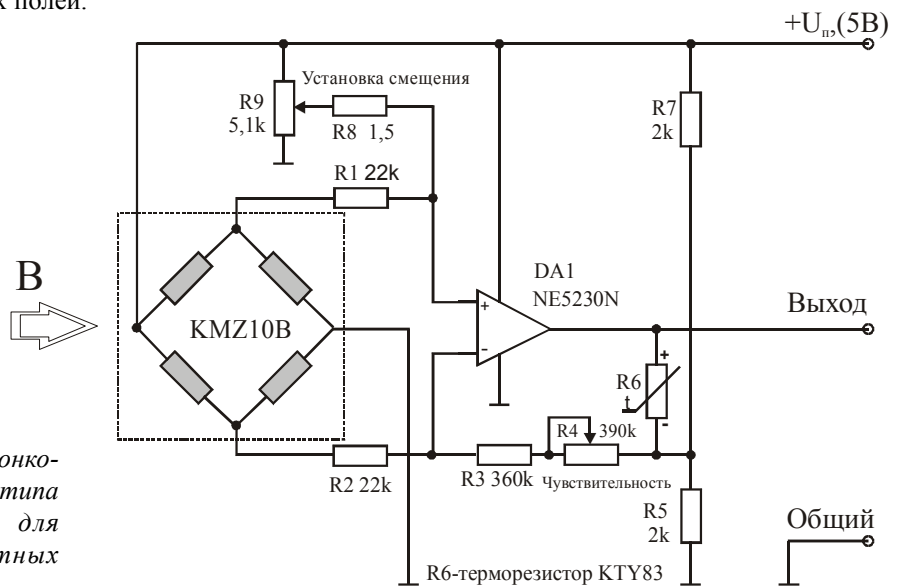


Рис. 2.55. Схема включения тонкопленочного магниторезистора типа KMZ10, предназначенная для регистрации слабых магнитных полей

Схема (рис. 2.55) обеспечивает следующие возможности:

- - компенсацию дрейфа чувствительности в зависимости от температуры через петлю обратной связи, которая включает в себя терморезистор типа КТУ 83-110;
- - регулировку смещения при помощи резистора R8;
- - регулировку чувствительности схемы при помощи многооборотного резистора R4 [32].

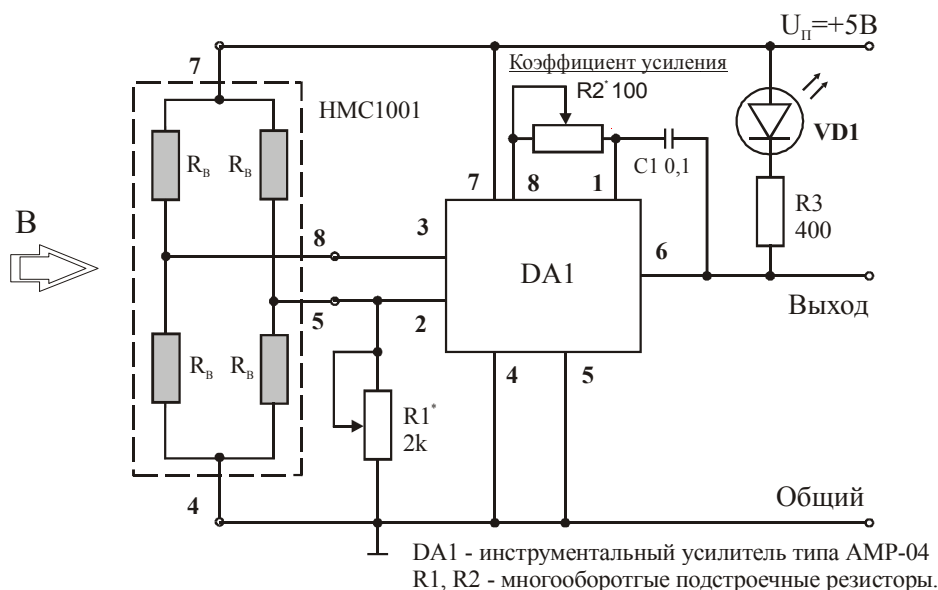
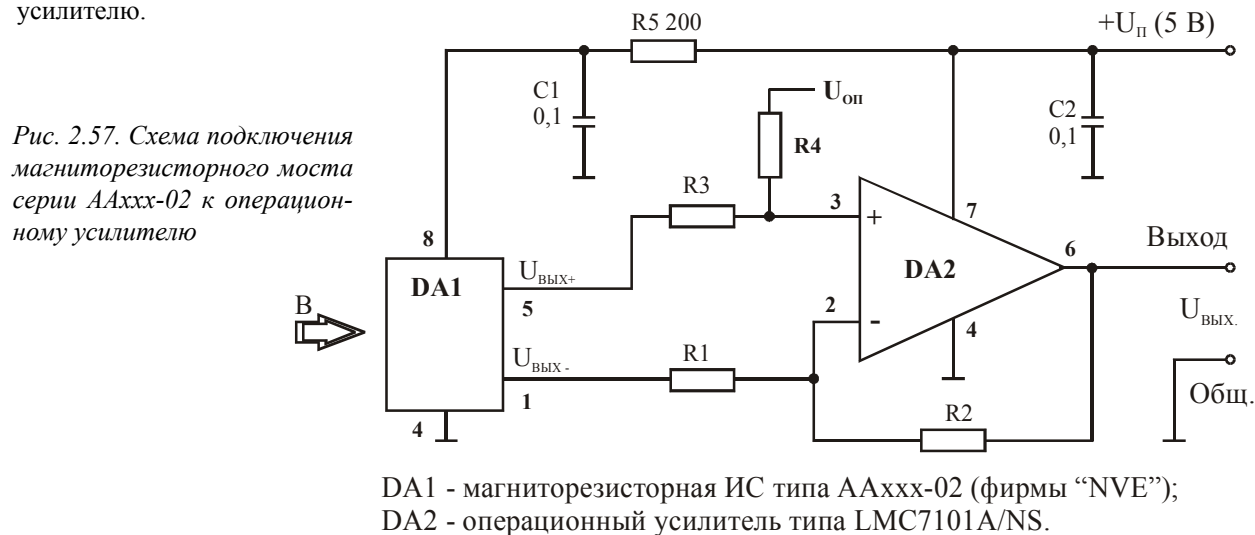


Рис. 2.56. Схема включения тонкопленочного магниторезисторного моста HMC1001, рекомендованная фирмой Honeywell

Схема, приведенная на рис. 2.56, может использоваться как в линейном (DA1 функционирует в качестве усилителя напряжения), так и в «цифровом» (DA1 используется в режиме компаратора) режиме. Режимы работы устанавливаются подстроечными резисторами R1 и R2.

На рис. 2.57–2.59 приведены схемы включения GMR магниторезисторных мостов (AA002-02 – AA002-05), рекомендуемые фирмой NVE [83].

На рис. 2.57 приводится схема подключения магниторезисторного моста серии AAxxx-02 к операционному усилителю.



Напряжение на выходе ОУ (DA2) в этом случае (рис. 2.57) определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \{ (U_{\text{ВЫХ}^+}) \times [(R2)/(R1 + R3)] \times [(R3 + R4)/R3] \cdot [(U_{\text{ВЫХ}^-}) \times (R4/R3)] \} + U_{\text{ОН}} \quad (2.13)$$

где $-R1 + R3 = R3 + R4 \gg 5 \text{ кОм}$.

На рис. 2.58 приведена схема использования магниторезисторного моста серии ААххх-02 с двумя операционными усилителями.

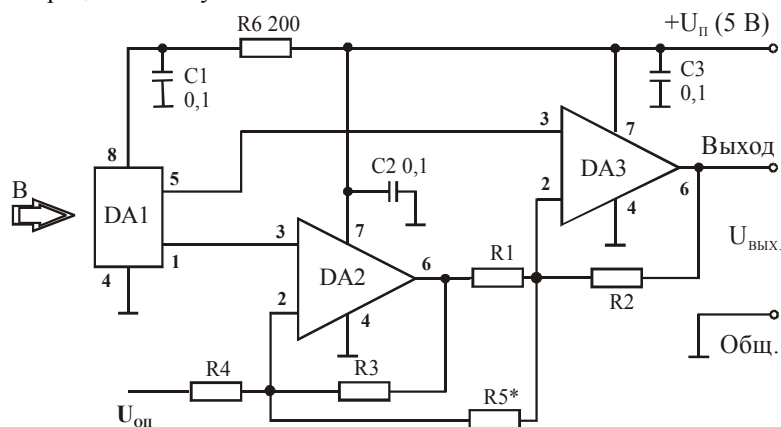


Рис. 2.58. Подключение магниторезисторного моста серии ААххх-02 к схеме, с двумя операционными усилителями

DA1 - магниторезисторный мост серии ААххх-02;
DA2, DA3 - операционные усилители.

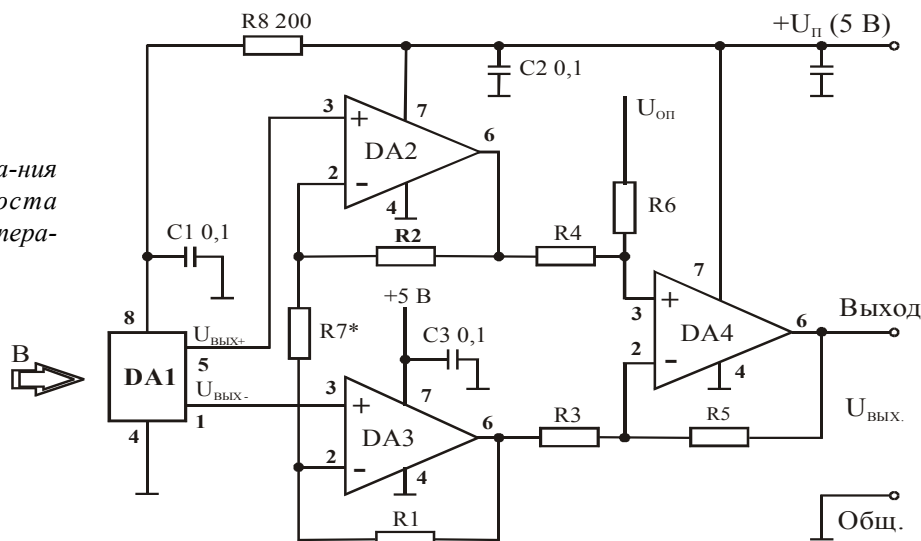
Напряжение на выходе ОУ (DA3) в этом случае (рис. 2.58) определяется, как:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} + U_{\text{ИН}} \times [1 + (R2/R1) + (2R2/R5^*)] \quad (2.14)$$

где $(R1/R2) = (R3/R4)$ и $U_{\text{ИН}} = (U_{\text{ВЫХ}+}) - (U_{\text{ВЫХ}-})$

На рис. 2.59 приведена схема использования магниторезисторного моста серии ААххх-02 с тремя операционными усилителями. Схема отличается высокой линейностью и точностью преобразования.

Рис. 2.59. Схема использования магниторезисторного моста серии ААххх-02 с тремя операционными усилителями



DA1 - магниторезисторная ИС серии ААххх-02 (фирмы "NVE");
DA2, DA3, DA4 - операционный усилитель типа LMC7101A/NS.

Напряжение на выходе ОУ (DA4) в этом случае (рис. 2.59) определяется, как

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{оп}} + \{[1 + (2R1/R7^*) \times (R4/R3)] \times U_{\text{ИН}}\} \quad (2.15)$$

где $R1 = R2$; $R3 = R5$; $R4 = R6$ и $U_{\text{ИН}} = (U_{\text{ВЫХ}+}) - (U_{\text{ВЫХ}-})$.

На рис. 2.60 приводится схема использования магниторезисторного моста серии ААххх-02 с инструментальным усилителем. Схема отличается простотой и высокими магнитоэлектрическими характеристиками. При применении схемы для приема модулированного магнитного потока, желательно использовать дополнительные частотнозависимые элементы (C1, C2, R1, R2). Напряжение на выходе схемы (DA2) определяется по формуле:

$$U_{\text{вых}} = \{[1 + (5 \times 10^4 / R3^*)] \times U_{\text{ИН}}\} + U_{\text{оп}} \quad (2.16)$$

где $R1=R2$; $C1=C2$ и $U_{\text{ИН}} = (U_{\text{ВЫХ}+}) - (U_{\text{ВЫХ}-})$,

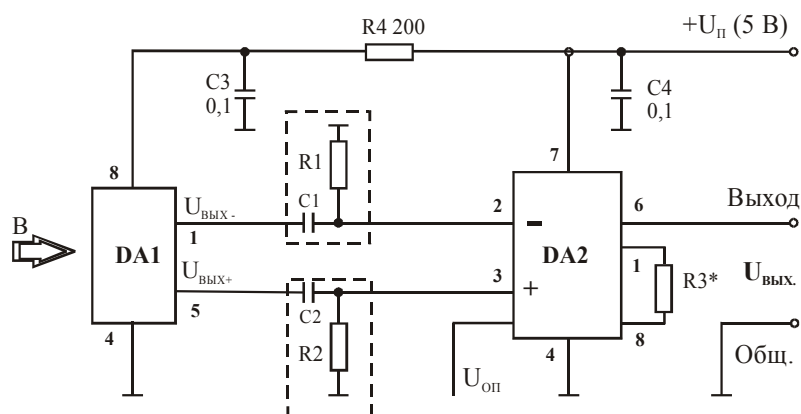


Рис. 2.60. Схема использования магниторезисторного моста серии ААххх-02 с инструментальным усилителем

DA1 - магниторезисторная ИС серии ААххх-02 (фирмы "NVE");

DA2 - инструментальный усилитель типа INA118/BB.

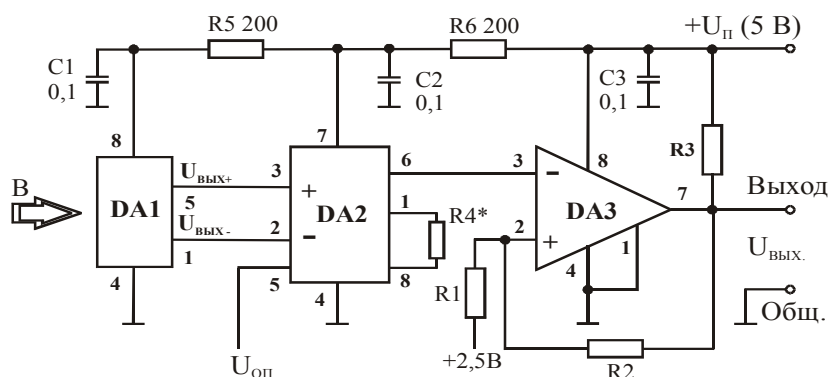
При этом полоса пропускания (F) устройства (рис. 2.60) определяется формулой:

$$F = 1 / 2\pi \times R1 \times C1 \quad (2.17)$$

На рис. 2.61 приведена схема порогового устройства использования магниторезисторного моста серии ААххх-02 с инструментальным усилителем и компаратором. При этом напряжение срабатывания компаратора $U_{\text{комп}}$ определяется, значением:

$$U_{\text{комп}} = 2,5 \times \{ [R1 / (R1 + R2 + R3)] \cdot [R2 / (R1 + R2)] \} \quad (2.18)$$

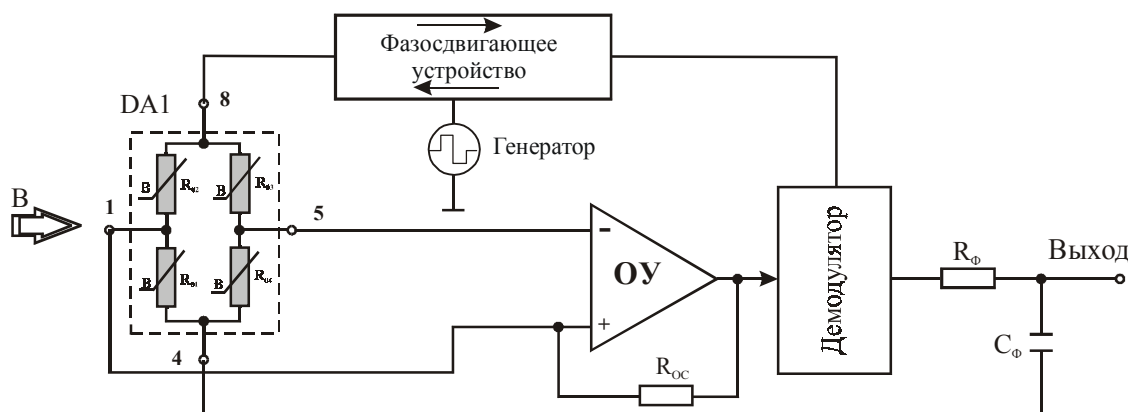
Рис. 2.61. Схема порогового устройства использования магниторезисторного моста серии ААххх-02 с инструментальным усилителем и компаратором



DA1 - магниторезисторная ИС серии ААххх-02 (фирмы "NVE");

DA2 - инструментальный усилитель типа INA 118/BB;

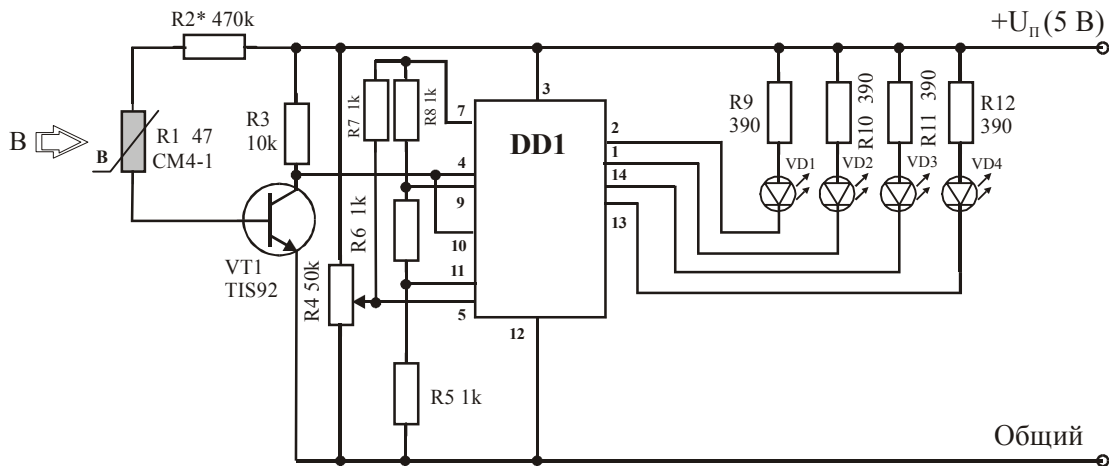
DA3 - компаратор типа IM311.



DA1 - магниторезисторная ИС серии ААххх-02 (фирмы "NVE").

Рис. 2.62. Упрощенная функциональная схема магнитоприемного устройства с модуляцией по цепи питания моста

Для приема слабых магнитных полей рекомендуется использование магнитоприемных устройств с модуляцией по цепи питания моста и последующей демодуляцией сигнала на выходе ОУ. На рис. 2.62 приведена упрощенная функциональная схема такого устройства. (Подробнее см. [83].).



DA1 - компаратор типа LM339;
R1 - магниторезистор типа CM4-1.

Рис. 2.63. Электрическая схема четырехуровневого магнитоприемного устройства

На рис. 2.63 дана электрическая схема четырехуровневого магнитоприемного устройства, выполненного с использованием «монолитного» магниторезистора и компаратора. Эта схема не требует особых пояснений.

Дополнительную информацию см. в [2, 11, 12, 13, 30, 34, 35, 36, 39, 43, 45, 66, 67, 68, 75, 76, 77, 83, 91, 92, 95, 99, 103, 175].

2.3. Магнитодиоды

Отдельную большую, группу преобразователей магнитного поля представляют магнитодиоды.

Магнитодиодом (МД) называется преобразователь магнитного поля, принцип действия которого основан на магнитодиодном эффекте [15, 24, 67].

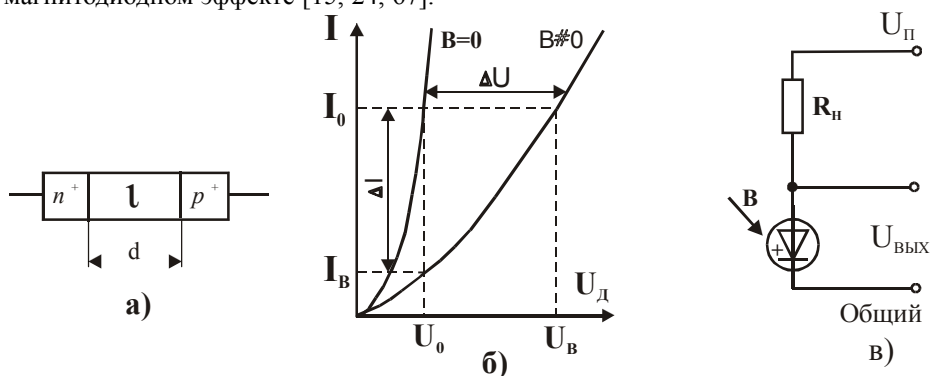


Рис. 2.64. К пояснению принципа действия магнитодиода: а – конструкция перехода; б – вольт-амперная характеристика; в – схема включения

Магнитодиод представляет собой полупроводниковый прибор с p - n – переходом и невыпрямляющими контактами, между которыми находится область высокоомного полупроводника (рис. 2.64а). Отличие от обычных полупроводниковых диодов состоит в том, что магнитодиод изготавливается из высокоомного полупроводникового материала, проводимость которого близка к собственной, ширина базы d в несколько раз больше диффузионной длины пробега носителей L , в то время как в обычных диодах $d < L$. В «длинных» диодах при прохождении электрического тока определяющими становятся процессы, зависящие от рекомбинации и движения неравновесных носителей заряда в базе и на поверхности [24].

В прямом направлении при высоких уровнях инжекции проводимость магнитодиода определяется инжектированными в базу неравновесными носителями. Падение напряжения происходит не на p - n -переходе, как в диоде, а на высокоомной базе.

Если магнитодиод, через который протекает ток, поместить в поперечное магнитное поле, то произойдет увеличение сопротивления базы.

Сопротивление базы увеличивается и за счет повышения роли поверхностной рекомбинации; отклоняющихся к поверхности полупроводника носителей заряда.

Эквивалентную схему магнитодиода можно представить в виде магниторезистора с последовательно включенным усилителем. Типичная вольт-амперная характеристика «торцевого» магнитодиода приведена на рис. 2.64.б.

Определения специфических параметров и терминов, используемых при описании работы магнитодиодов, даны в табл. 2.10.

Для изготовления МЧЭ элементов магнитодиодов в основном используются германий (Ge) и кремний (Si).

В настоящее время существует широкая номенклатура магнитодиодов, отличающихся технологией их изготовления и разнообразием конструктивного оформления. При производстве магнитодиодов используются сплавная, биполярная, МОП и другие технологии.

Конструкции магнитодиодов и «обычных диодов во многом похожи. Принципиальная разница заключается в том, что корпус магнитодиодов выполняется из немагнитного материала.

2.3.1. Кремниевые магнитодиоды

Кремниевые магнитодиоды составляют отдельную группу преобразователей магнитного поля. Первые магнитодиоды изготавливались по отработанным в свое время сплавной и планарной технологиям, широко применяемым при изготовлении обычных (выпрямительных) диодов.

На основе типовых технологий в СССР были разработаны и серийно выпускались кремниевые магнитодиоды серий КД301, КД303 и КД304.

«Торцевые» магнитодиоды КД301А..КД301Ж.

Магнитодиоды КД301А...КД301Ж изготавливались по сплавной технологии с использованием методов ионного легирования.

Магниточувствительный элемент магнитодиода выполнен из высокоомного кремния и представляет собой кристалл размером $1\text{г}0,5\text{г}0,5$ мм. К контактным площадкам кристалла припаяны плоские проволочные выводы. Вся конструкция защищена эпоксидным компаундом ЭП-91.

Магнитодиоды серии КД301 обладают одинаковой чувствительностью к магнитной индукции независимо от ее направления.

Таблица 2.10. Специфические термины и определения основных параметров магнитодиодов

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение (альтернативное обозначение)	Единица измерения	Определение
Прямое напряжение	U_m (U_F)	В	Падение напряжения на магнитодиоде в проводящем направлении при пропускании через него номинального прямого тока $I_{ном}$ и в отсутствии поперечного магнитного поля.
Прямой рабочий ток	$I_{ном}$	А (мА)	Значение прямого (неизменного во времени) тока через магнитодиод, длительное протекание которого не вызывает его недопустимого перегрева прибора.
Максимально допустимый прямой импульсный ток	$I_{ном.имп.}$	А (мА)	Ток, определяемый из условий, что длительность импульса должна быть не более 6 мс, а средняя рассеиваемая мощность на магнитодиоде не превышает допустимую.
Максимально допустимый постоянный обратный ток	$I_{обр.}$	А (мА)	Ток, равный значению обратного тока при приложении к магнитодиоду обратного напряжения в 100 В.
Максимально допустимая рассеиваемая мощность	$P_{макс}$ (P_{tot})	Вт (мВт)	Мощность, определяемая из условий, что магнитодиод помещен в среду неподвижного воздуха при температуре 25 ⁰ С, а температура <i>p-n</i> перехода магнитодиода при этом не превышает допустимую.
Выходной сигнал (по напряжению)	$U_{вых}$	В	Представляет собой разность выходных напряжений: $\Delta U = U_{вых} = U_B - U_0$, где U_B – напряжение на выходе магнитодиода при номинальном значении индукции магнитного поля; U_0 – напряжение на выходе магнитодиода при отсутствии магнитного поля. ($B=0$)
Магнитная чувствительность магнитодиода по напряжению.	γ_u (K_{BO})	В/Тл мВ/мТл	Отношение напряжения выходного сигнала магнитодиода к значению номинальной индукции: $\gamma_u = U_{вых}/B_{ном}$ где $U_{вых}$ – напряжение сигнала на выходе магнитодиода.
Выходной сигнал (по току)	$I_{вых}$	А (мА)	Представляет собой разность выходных токов: $\Delta I = I_{вых} = I_B - I_0$, где I_B – ток, протекающий через магнитодиод при номинальном значении индукции магнитного поля; I_0 – ток, протекающий через магнитодиод при отсутствии магнитного поля и ($B=0$)
Магнитная чувствительность магнитодиода по току.	γ_I (K_{BO})	А/Тл мА/мТл	Отношение выходного тока сигнала магнитодиода к значению номинальной индукции: $\gamma_I = I_{вых}/B_{ном}$
Разность магниточувствительностей (степень асимметрии) магнитодиода	$\Delta\gamma_u$	В/Тл мВ/мТл	Определяется как разность магнитной чувствительности магнитодиода возникающая при изменении направления управляющего магнитного поля: $\Delta\gamma_u = \gamma_u^+ - \gamma_u^-$, где γ_u^+ – чувствительность при «положительном» направлении магнитного поля; γ_u^- – чувствительность при «отрицательном» направлении магнитного поля.

Планарные магнитодиоды серии КД303А – КД303Ж изготавливались по планарной технологии.

Магниточувствительный элемент магнитодиода выполнен из высокоомного кремния и представляет собой кристалл размером 2г1г0,4 мм. К контактным площадкам кристалла припаяны плоские проволочные выводы. Вся конструкция защищена эпоксидным компаундом ЭП-91.

Структура МЧЭ магнитодиодов КД303А – КД303Ж не симметрична и при обоих направлениях тока ВАХ и магнитная чувствительность приборов не одинаковы.

Планарные магнитодиоды серии КД304А-1 – КД304Ж-1 изготавливались по планарной технологии с использованием ионного легирования. Конструкция этих магнитодиодов аналогична конструкции КД303. Структура МЧЭ магнитодиодов КД304А-1 – КД304Ж-1 симметрична и при обоих направлениях тока ВАХ и магнитная чувствительность приборов примерно одинаковы.

Планарные магнитодиоды КД304А1-1 – КД304Ж1-1 являются модифицированным вариантом магнитодиодов КД304А-1 – КД304Ж-1. Они выпускались по упрощенной технологии. Конструкция магнитодиодов КД304А1-1 – КД304Ж1-1 идентична конструкции магнитодиодов КД304А-1 – КД304Ж-1.

Параметры и конструкция (рис. 2.65) отечественных кремниевых магнитодиодов, в основном, соответствуют показателям их зарубежных аналогов [24, 27, 54, 42].

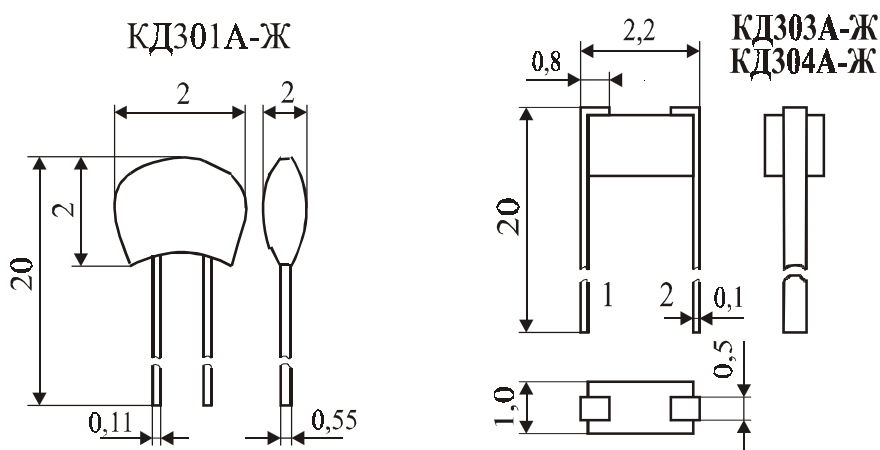


Рис. 2.65. Внешний вид кремниевых магнитодиодов отечественного производства

Основные параметры и характеристики кремниевых магнитодиодов отечественного производства приведены в главе 11 тома 2.

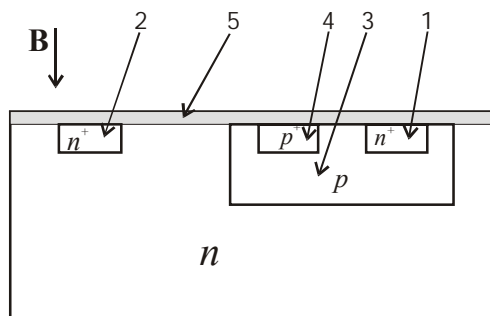
Кроме магнитодиодов серии КД303 – КД304 в России и за рубежом разрабатываются новые приборы, основанные на использовании современных технологических процессов. Ниже рассматриваются некоторые варианты магнитодиодов, выпускаемых по новым технологиям.

Магнитодиоды на основе МОП -технологии

На рис. 2.66 приведена одна из структур интегрального магнитодиода, изготовленного с использованием типовой МОП -технологии.

Интегральный магнитодиод формируется по МОП технологии в процессе изготовления интегральных микросхем.

Рис. 2.66. Структура магнитодиода, изготовленного с использованием МОП-технологии: 1 – область эмиттера; 2 – контакт к коллектору магнитодиода; 3 – базовая область магнитодиода; 4 – контакт к базовой области; 5 – граница раздела оксид кремния – кремний



Область эмиттера 1 и контакт к коллектору 2 магнитодиода реализованы на основе n^+ областей стока–источка n МОП транзистора, базовая область 3 формируется на основе диффузионной области кармана p типа, контакт к базовой области 4 – на основе p^+ областей стока–источка p МОП транзистора, коллектором является подложка n типа.

В данной конструкции граница раздела окисел–кремний 5 играет роль поверхности с низкой скоростью рекомбинации, а обратносмещенный p - n переход база–коллектор – роль поверхности с высокой скоростью рекомбинации носителей заряда.

Отличительные особенности данного прибора: магниточувствительный элемент эффективно работает при высоком уровне инжекции; полезный сигнал снимается между электродами эмиттер–база [69].

Магнитодиоды на основе технологии «кремний на сапфире»

С. Кордичем [12] предложена оригинальная конструкция магнитодиода, изготовленного по технологии «кремний на сапфире» (КНС). На рис. 2.67 приведен один из вариантов структуры такого прибора.

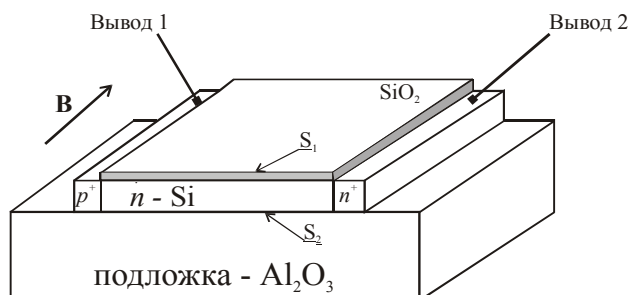


Рис. 2.67. Структура магнитодиода, изготовленного по технологии «кремний на сапфире»

Принцип действия магнитодиода (рис. 2.67) заключается в следующем.

Электроны и дырки из n^+ и p^+ областей в слаболегированную n область, где они дрейфуют под воздействием электрического поля. Поверхность раздела (Si-SiO_2) в пластине имеет низкую скорость рекомбинации S_1 по сравнению со скоростью рекомбинации S_2 нижней границы раздела ($\text{Si-Al}_2\text{O}_3$). Магнитное поле в плоскости отклоняет носители заряда к одной из плоскостей, и в вольтамперной характеристике происходят соответствующие изменения. Прибор имеет высокую магнитную чувствительность. Однако есть и некоторые недостатки.

Основным недостатком считается сильная нелинейность энергетической характеристики чувствительности, которая зависит от направления воздействующего магнитного поля. Дополнительной проблемой является и сильная зависимость параметров прибора от температуры [37].

Температурные характеристики кремниевых магнитодиодов

Параметры магнитодиодов зависят от температуры окружающей среды.

Температурные зависимости магнитной чувствительности кремниевых магнитодиодов приведены на рис. 2.68.

Температурный коэффициент сопротивления (ТКС) при малых токах имеет отрицательное значение, а при больших ($U_d > U_{\text{инв}}$) – положительное. В работах Г. А. Егизаряна и др. [28, 29] рассмотрены зависимости ТКС от индукции магнитного поля при различных температурах. В области слабых магнитных полей наблюдается прямая температурная зависимость сопротивления, а в области сильных – инверсная.

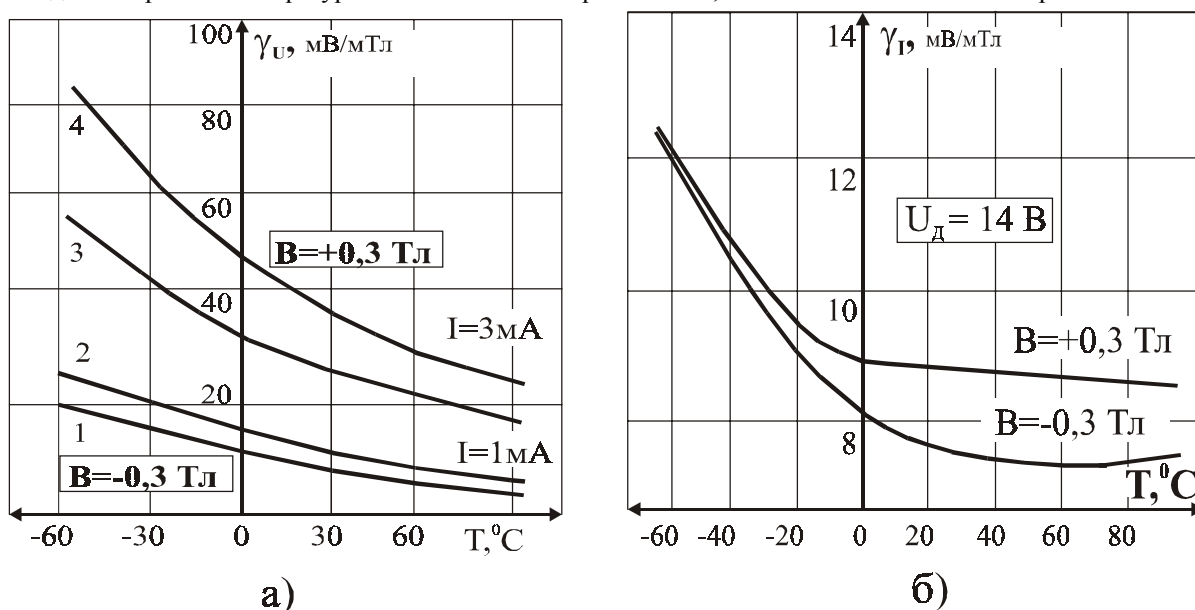


Рис. 2.68. Типичные температурные зависимости: а – вольтовой магнитной чувствительности; б – токовой магнитной чувствительности (в магнитном поле $B_{\pm} = \pm 0,3 \text{ Тл}$.)

Для каждого значения тока, протекающего через магнитодиод, существует такое значение магнитной индукции, при котором температурная зависимость тока меняет знак. Это значение индукции, убывает с ростом напряжения смещения (U_d). Вблизи этих значений магнитной индукции обеспечивается слабая зависимость от температуры, как вольтамперной характеристики, так и магнитной чувствительности.

Каждая группа магнитодиодов имеет несколько различающиеся оптимальные значения магнитной индукции в рабочем диапазоне температур. Это следует учитывать при разработке аппаратуры с применением кремниевых магнитодиодов.

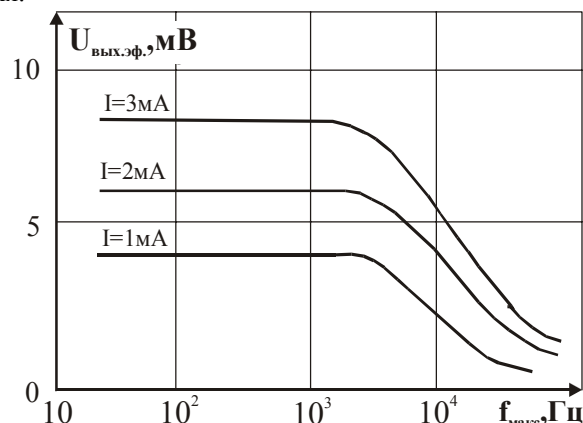
Для магнитодиодов КД301А – КД301Ж область слабой температурной зависимости тока при $I = 1 \text{ mA}$ расположена в интервале значений $B = 0,12\text{--}0,17 \text{ Тл}$, а при токе $I = 3 \text{ mA}$ – в интервале значений $B = 0,11\text{--}0,13 \text{ Тл}$. Для магнитодиодов КД304А-1 – КД304Ж-1 при токе $I = 1 \text{ mA}$ эта область расположена в интервале при $B = 0,12\text{--}0,17 \text{ Тл}$ [24, 54].

Кремниевые магнитодиоды обладают лучшей температурной стабильностью и значительно более широким температурным рабочим диапазоном по сравнению с германиевыми магнитодиодами [28, 29].

Частотные характеристики кремниевых магнитодиодов

Магнитная чувствительность магнитодиодов зависит и от частоты переменного магнитного поля. В магнитном поле происходит изменение распределения инжектированных в базу носителей и изменение инжекции из p - n -перехода. Инерционностью этих процессов и определяется зависимость магнитной чувствительности от частоты модуляции магнитного поля.

Рис. 2.69. Частотная зависимость эффективного значения переменной составляющей приложенного к магнитодиоду напряжения смещения ($U_{эф}$) под действием поперечного переменного магнитного поля в режиме малого сигнала для магнитодиодов КД301А – КД301Ж



На рис. 2.69 приведена частотная зависимость эффективного значения переменной составляющей приложенного к магнитодиоду напряжения смещения ($U_{эф}$) под действием поперечного переменного магнитного поля в режиме малого сигнала для магнитодиодов КД301А – КД301Ж. Из рис. 2.69 видно, что сигнал не зависит от частоты до частот, равных нескольким килогерцам [24].

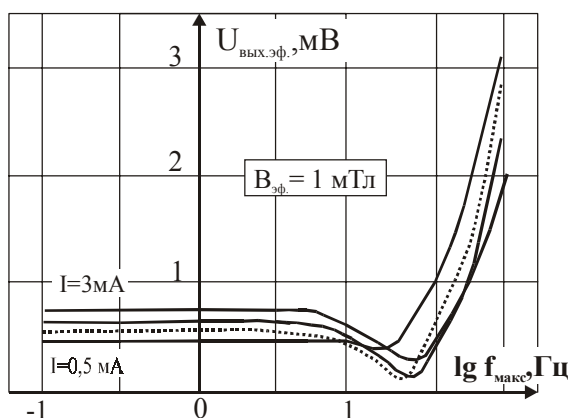


Рис. 2.70. Зависимость эффективного значения переменной составляющей напряжения на магнитодиоде от частоты модуляции магнитного потока для диодов КД304А-1 – КД304Ж-1

В магнитодиодах КД304А-1 – КД304Ж-1 частотная зависимость $U_{эф}$ имеет сложный вид: после «плато» наблюдается минимум (рис. 2.70), а затем (на частоте 20–30 кГц) – максимум. Поскольку прямая и обратная ветви ВАХ магнитодиодов КД304А-1 – КД304Ж-1 имеют симметричный вид, то аналогичный вид имеет и частотная зависимость для обратной ветви ВАХ.

Частотная характеристика магнитодиодов КД304А1-1 – КД304Ж1-1 аналогична частотным зависимостям магнитодиодов КД304А-1 – КД304Ж-1. Граничная частота для магнитодиодов – примерно 10 кГц [22, 24].

Пороговые характеристики кремниевых магнитодиодов

Пороговые характеристики магнитодиодов определяются уровнем собственных шумов. Составляющие этих шумов рассматриваются в литературе [5, 10, 21].

Условно уровень шумов характеризуется коэффициентом шума K , определяемым отношением наблюдаемых флуктуаций к амплитуде тепловых шумов.

На рис. 2.71 приведены частотные зависимости коэффициента шума (K) магнитодиодов в отсутствие магнитного поля при различных значениях прямого тока.

Из рис. 2.71 видно, что в области низких частот ($f < 10^3$ Гц) величина K практически не зависит от частоты. При этом в области токов порядка 1 мА уровень шумов магнитодиода превышает уровень тепловых шумов. В области $f > 10^3$ Гц коэффициент K уменьшается и при частотах порядка в пределах 10 МГц для всех значений токов принимает значение порядка единицы. С увеличением тока через магнитодиод коэффициент шума (K) сильно растет, особенно в области низких частот.

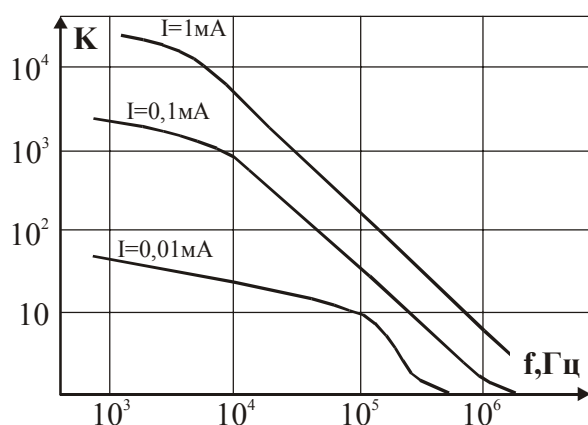


Рис. 2.71. Типовая зависимость коэффициента шума (K) кремниевых магнитодиодов от частоты при $B = 0$

Пороговая чувствительность B_{Π} (см. табл. 2.1) характеризуется минимальной магнитной индукцией, которую можно обнаружить с помощью магнитодиода. На рис. 2.72 приведены результаты расчета пороговой чувствительности при различных значениях прямого тока через магнитодиод для частоты модуляции магнитного потока 1 кГц, при полосе пропускания измерительного тракта 10 Гц и отношении сигнал/шум, равном единице [24].

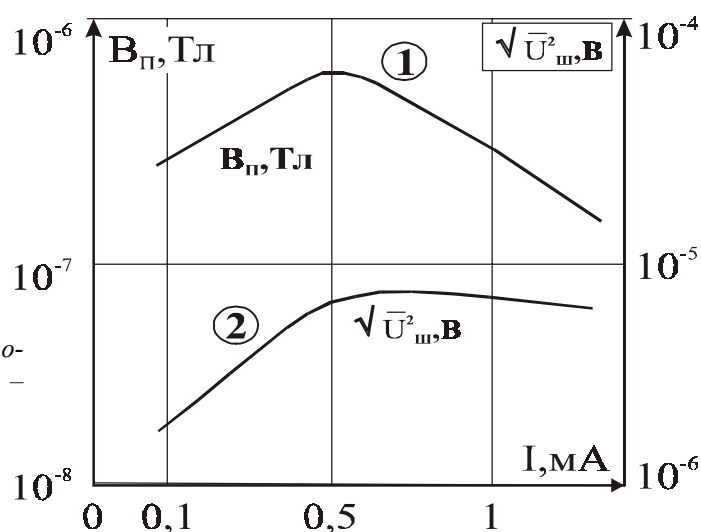


Рис. 2.72. Зависимости от тока через магнитодиод: 1 – пороговой чувствительности; 2 – среднего квадрата шумового напряжения

2.3.2. Полярные магнитодиоды

Полярными называют магнитодиоды, в которых знак изменения тока зависит от направления магнитного поля. Типичная вольт-амперная характеристика кремниевого магнитодиода с полярной чувствительностью приведена на рис. 2.73.а [24].

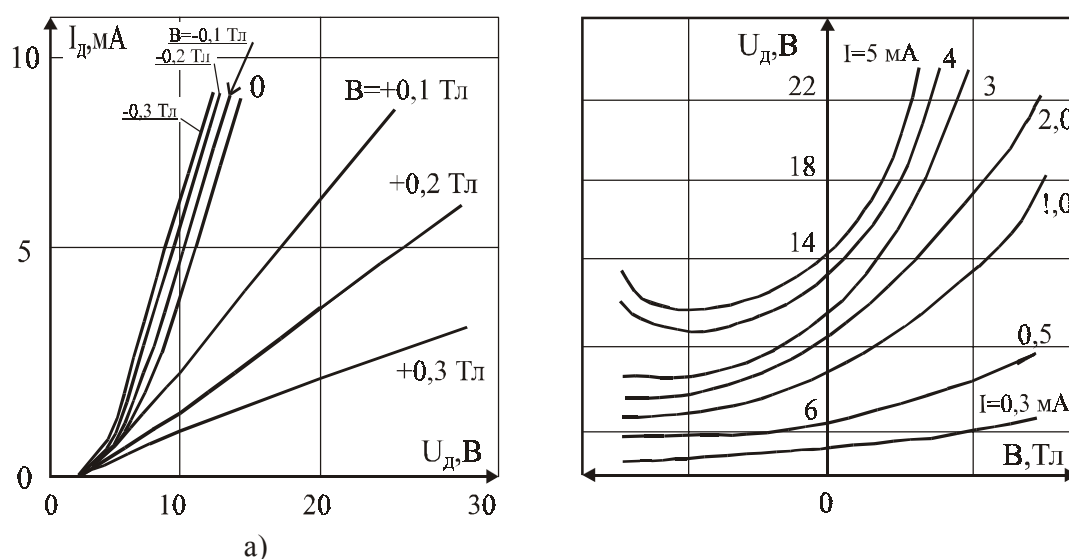
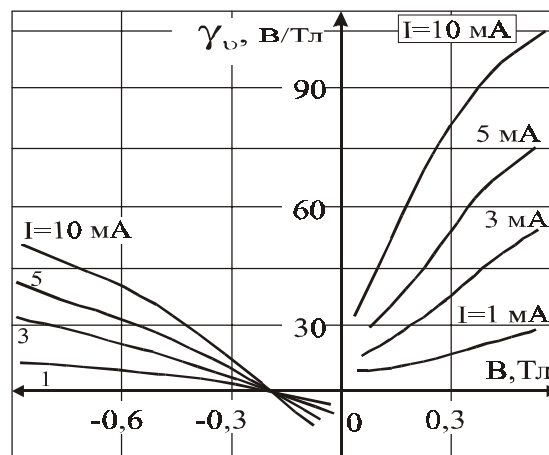


Рис. 2.73. Типичные характеристики кремниевого магнитодиода с полярной чувствительностью: а — вольт-амперная; б — вольт-тесловая

Зависимость тока, протекающего через диод, от напряжения при малых смещениях близка к линейной. В рабочей области токов ВАХ можно аппроксимировать степенным законом $I_{\text{д}}$, где показатель степени $a > 2$. Показатель степени a зависит от конструкции магнитодиода, а также от направления и значения индукции управляющего магнитного поля. В поле B^- он несколько возрастает, а в поле B^+ — убывает.

Полярная магниточувствительность наблюдается в широком диапазоне токов и значений индукций магнитного поля (рис. 2.73.б). При слабых магнитных полях $B < 0,1$ Тл отрицательная и положительная магниточувствительности примерно равны. Минимум вольт-тесловой характеристики полярных магнитодиодов смещен в область отрицательных значений индукции. Дифференциальная вольтовая магниточувствительность около минимума меняет знак. Зависимость вольтовой магнитной чувствительности от индукции магнитного поля приведена на рис. 2.74.

Рис. 2.74. Зависимость вольтовой магнитной чувствительности полярного магнитодиода от индукции управляющего магнитного поля



Температурная зависимость ВАХ полярных магнитодиодов аналогична зависимости от температуры ВАХ неполярных диодов. Температурная зависимость магниточувствительности в поле B^+ сильнее, чем в поле B^- [26, 29].

На рис. 2.75 приведены частотные характеристики зависимости эффективного значения переменной составляющей прямого напряжения полярного магнитодиода при различных токах $I_{\text{д}}$. При низких частотах модуляции магнитного потока магнитная чувствительность постоянна примерно до 10 кГц. При дальнейшем увеличении частоты магниточувствительность уменьшается. Граничная частота полярных магнитодиодов составляет примерно 20 кГц [24].

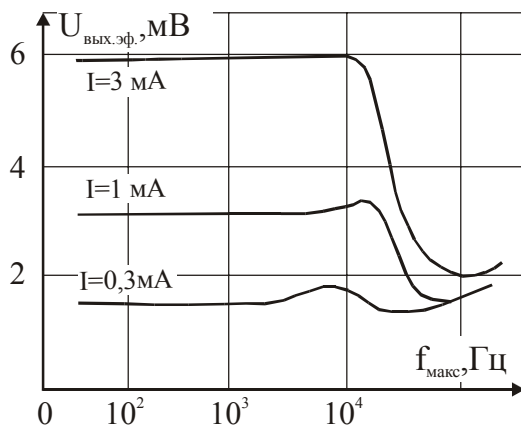


Рис. 2.75. Зависимость эффективного значения переменной составляющей прямого напряжения от частоты модуляции магнитного потока для полярного магнитодиода

2.3.3. Магнитодиоды с эффектами переключения и «памяти»

С появлением халькогенидных полупроводниковых стекол были разработаны магнитодиоды, обладающие специфическими характеристиками. Промышленный выпуск таких приборов еще впереди, поэтому ограничимся кратким описанием принципов их работы [24].

Действие магнитодиодов основано на использовании оригинальных свойств халькогенидных стекол. Слои халькогенидных полупроводниковых стекол, если их поместить между металлическими электродами, обладают симметричными вольт-амперными характеристиками с участками отрицательного сопротивления, разделяющими два возможных устойчивых состояния — высокоомное и низкоомное. При определенных составах халькогенидных стекол такие структуры после перехода в низкоомное состояние остаются в нем, и после снятия напряжения смещения, то есть в них наблюдается эффект «памяти». Перепад сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях может превышать 3–4 порядка при отношении порогового напряжения к остаточному до 10–50 раз. Эффекты переключения и «памяти» определяются объемными процессами и не связаны с существованием р-п или гетеропереходов.

На рис. 2.76.а,б показана структура магнитодиода с аморфно-кристаллическим гетеропереходом, реализованная на базе структур отечественных магнитодиодов типа КД303, КД304. На рис. 2.76.в приведена вольт-амперная характеристика такого диода [24].

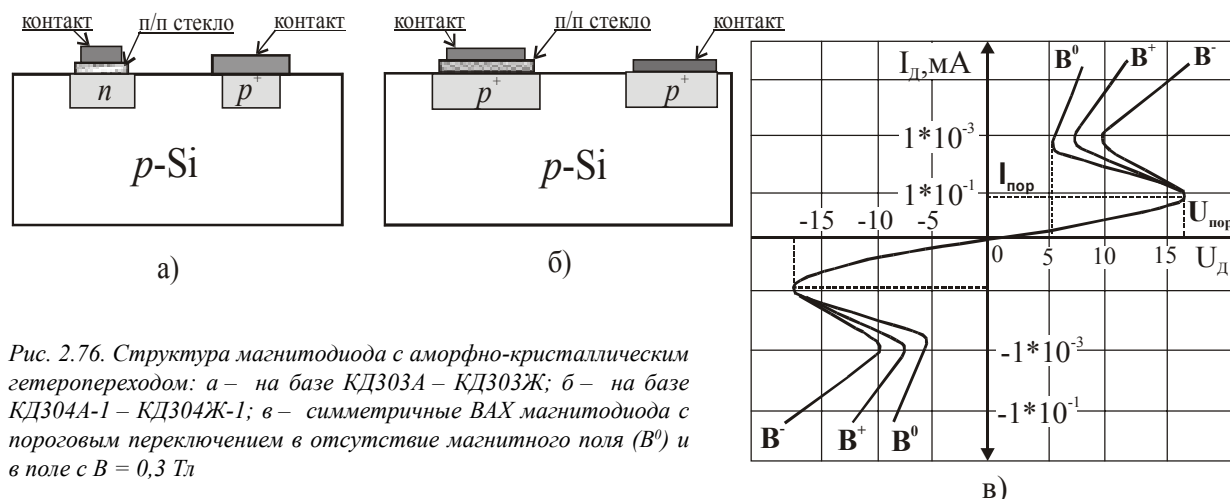


Рис. 2.76. Структура магнитодиода с аморфно-кристаллическим гетеропереходом: а – на базе КД303А – КД303Ж; б – на базе КД304А-1 – КД304Ж-1; в – симметричные ВАХ магнитодиода с пороговым переключением в отсутствие магнитного поля (B^0) и в поле с $B = 0,3$ Тл

Пороговая напряженность электрического поля, обеспечивающая переключение прибора в проводящее состояние, равна 10^5 – 10^6 В/см. Время переключения – около 10^{-9} с при времени задержки порядка 10^{-6} с. Напряжение переключения, остаточное напряжение и сопротивление структуры в низкоомном состоянии сильно зависят от индукции управляющего магнитного поля. Вольт-амперные характеристики таких магнитодиодов на основе КД304А-1 – КД304Ж-1 симметричны и даны на рис. 2.76в.

На рис. 2.77 приведены вольт-амперные характеристики магнитодиодов, созданных на основе полупроводниковых структур диодов КД303А – КД303Ж, КД304А-1 – КД304Ж-1 в отсутствие магнитного поля и в магнитном поле с индукцией $B = 0,3$ Тл разных направлений. Пороговое напряжение приборов составляет 28–30 В. Вольт-амперная характеристика до переключения линейна. Время переключения магнитодиода меньше 1 мкс.

Состояние с низким сопротивлением после переключения сохраняется и после снятия напряжения смещения. Напряжение переключения и параметры после переключения зависят не только от индукции, но и от направления магнитного поля [24].

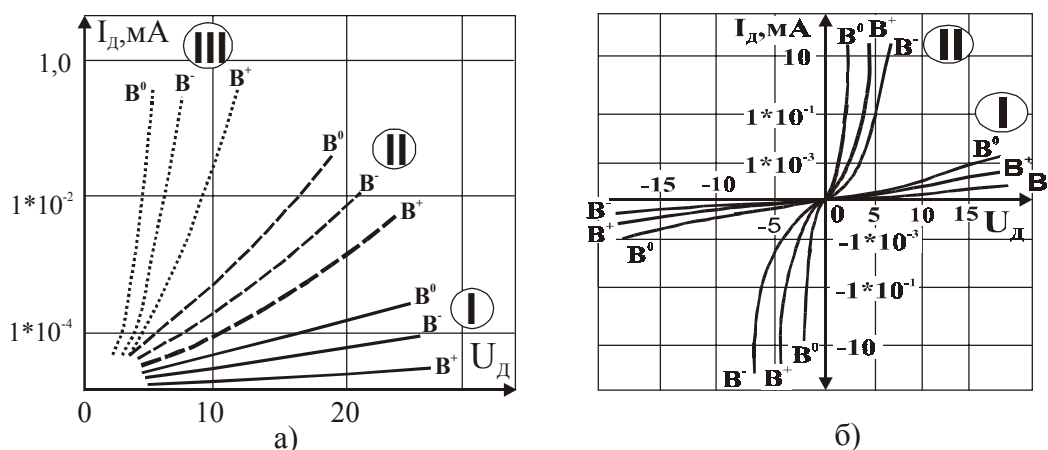


Рис. 2.77. Типичные ВАХ магнитодиодов с «памятью» в отсутствие магнитного поля (B^0) и в поле с различным направлением магнитной индукции: а – КД303; б – КД304; I – высокоомное состояние халькогенидного стекла; II – низкоомное состояние халькогенидного стекла; III – без слоя стекла

Поскольку магнитодиод со слоем халькогенидного стекла сохраняет информацию о проводящем состоянии и при нулевом смещении, то он может быть использован в качестве элементов памяти в магнитоуправляемых интегральных схемах. Полное сопротивление магнитодиода с халькогенидным стеклом (рис. 2.77а,б) в проводящем состоянии на 1–2 порядка больше, чем сопротивление магнитодиода без этого слоя.

Эффект «памяти» в слоях халькогенидных стекол объясняется перерастанием кристаллизующегося «шнура» от отрицательно заряженного электрода к положительному. Проводимость этих соединений в кристаллическом состоянии намного выше, чем в аморфном. Когда «шнур» достигает противоположного металлического контакта, устанавливается низкоомное состояние. «Шнур» сохраняется и без приложенного напряжения смещения, что и обеспечивает память. Таким образом, наличие двух метастабильных состояний магнитодиодов со слоем халькогенидного стекла связано с фазовым переходом в объеме слоя.

Стирание памяти – переход из низкоомного в высокоомное состояние – обеспечивается подачей короткого импульса тока длительностью 10 мкс [24].

2.3.4. Германиевые магнитодиоды

Конструкция германиевых магнитодиодов практически не отличается от конструкции кремниевых. Для изготовления германиевых магнитодиодов используется сплавная и планарная технологии.

В первых магнитодиодах величина удельной магнитной чувствительности не превышала 500 В/ТлГА [15, 24, 33]. Японская фирма Sony серийно выпускает германиевые магнитодиоды с удельной магнитной чувствительностью до $2 \cdot 10^4$ В/ТлГА. Типичная вольт-амперная характеристика магнитодиода приведена на рис. 2.78 [24, 42].

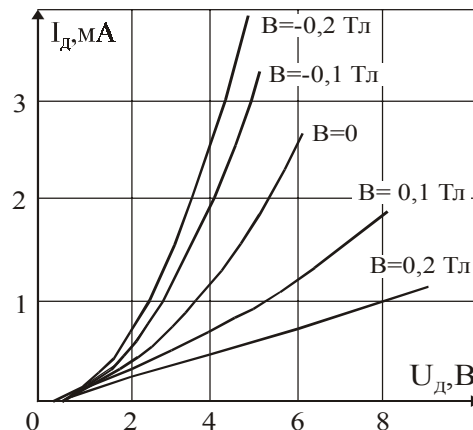


Рис. 2.78. Типичная вольт-амперная характеристика германиевого магнитодиода

Одинаковые магнитодиоды могут включаться последовательно. Характеристики двух последовательно включенных германиевых магнитодиодов даны на рис. 2.79.

При отсутствии магнитного поля напряжение питания U_d делится пополам. При воздействии магнитного поля сопротивление одного диода уменьшается, а другого – увеличивается, что приводит к изменению напряжения $U_{вых}$. Такие приборы («двойки») изготавливаются в одном кристалле и размещаются в одном общем корпусе, что значительно повышает термическую стабильность аппаратуры.

Из двух «двоек» можно составить измерительный мост, состоящий из четырех магнитодиодов. В этом случае целесообразно объединить попарно два магнитодиода верхней половины моста и два магнитодиода нижней половины, используя для верхней части общий анод, а для нижней – общий катод.

Преимуществом германиевых магнитодиодов является высокая удельная магнитная чувствительность при низких напряжениях источника питания. Наивысшая чувствительность этих магнитодиодов достигается при больших значениях сопротивления нагрузки ($R_H = (1 - 100 \text{ МОм})$), но при этом сильно увеличивается постоянная времени и возрастает напряжение питания.

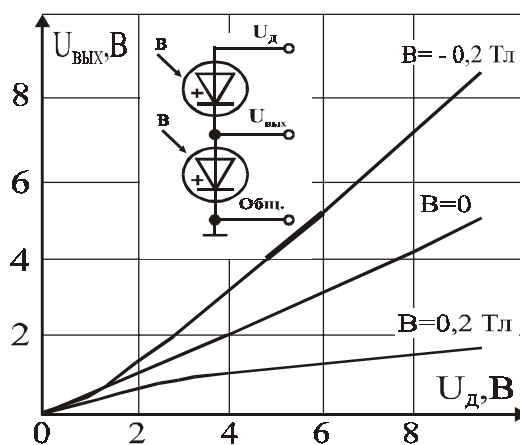


Рис. 2.79. Характеристики двух последовательно включенных германиевых магнитодиодов

Главным недостатком германиевых магнитодиодов считается сравнительно низкая предельная температура эксплуатации – до $+85^\circ\text{C}$.

2.3.5. Применение магнитодиодов

Магнитодиоды применяются в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках: скорости и направления вращения, угла поворота и преобразователях типа «угол–код», уровня и т.п. Их используют в бесконтактной клавиатуре ПЭВМ, вентильных электродвигателях, бесконтактных реле предельного тока, регуляторах электрической мощности, в бытовой электронной аппаратуре, системах автоматического управления, устройствах считывания информации ЭВМ, в электронных и электрифицированных игрушках и др.

Высокая магнитная чувствительность магнитодиодов позволяет использовать их в бесконтактных системах электронного зажигания; системах умножения и деления; схемах измерения электрической мощности и мощности СВЧ-излучения; в магнитной дефектоскопии для контроля качества проката труб, стальных деталей, рельсов, элементов ходовой части транспорта; в биологии и медицине в качестве датчиков измерения пульса, кровяного давления и глубины дыхания и т.д. [67, 24]. Современная групповая технология ИС позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе магнитодиодов, которые могут формироваться как в линейные, так и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом организации.

Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей (лент, карт и т.п.).

Подробнее о способах организации многоканальных и многоэлементных магниточувствительных структур, а так же о возможных областях их применения см. в главах 4 и 6.

Особенности применения магнитодиодов

При использовании магнитодиодов необходимо учитывать те же требования и условия, что и при эксплуатации других типов преобразователей магнитного поля, а также те, которые указаны в нормативно-технической документации.

Магнитодиоды следует устанавливать таким образом, чтобы силовые линии источника управляющего магнитного поля были перпендикулярны боковым граням полупроводниковой структуры.

Допускается работа нескольких магнитодиодов при их последовательном соединении.

Схемы включения магнитодиодов

Схему включения магнитодиода выбирают исходя из конкретных условий применения и, как правило, индивидуально для каждого типа приборов.

На рис. 2.80 даны без объяснений две простейшие схемы включения магнитодиодов в электрическую схему.

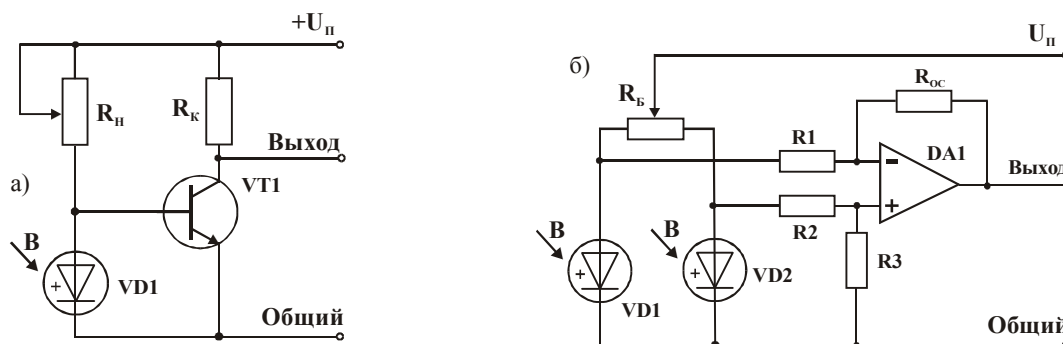


Рис. 2.80. Простейшие схемы включения магнитодиодов: а – в транзисторный каскад; б – к операционному усилителю

Дополнительную информацию: см. в [10, 15, 18, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 33, 41, 42, 54, 59, 65, 66, 67].

2.4. Магнитотранзисторы

Из известных полупроводниковых преобразователей магнитного поля наиболее перспективными считаются магниточувствительные транзисторы – приборы, обладающие высокой чувствительностью и разрешающей способностью.

Магнитотранзисторами (МТ) называются транзисторы, конструктивные и рабочие параметры которых оптимизированы для получения максимальной чувствительности коллекторного тока к магнитному полю. (В зарубежной литературе магнитотранзисторы иногда называют *магнисторы*).

В зависимости от того, параллельно или перпендикулярно технологической поверхности кристалла протекает рабочий ток, магнитотранзисторы условно подразделяются на вертикальные и горизонтальные (латеральные) магнитотранзисторы.

Вертикальные магнитотранзисторы (ВМТ) могут реагировать лишь на лежащую в плоскости кристалла (продольную) компоненту магнитного поля, а *горизонтальные* (ГМТ) – также и на перпендикулярную этой плоскости поперечную компоненту.

В зависимости от того, к перпендикулярной или параллельной составляющей (относительно технологической поверхности) магнитного поля чувствительны магнитотранзисторы, они делятся соответственно на *поперечные* и *продольные*.

В зависимости от природы переноса неосновных носителей заряда в базе, магнитотранзисторы, в свою очередь, делятся на *диффузионные* и *дрейфовые*.

2.4.1. Биполярные магнитотранзисторы

Обычный *биполярный транзистор* представляет собой полупроводниковую структуру *p-n-p* или *n-p-n* типа с контактами в каждой из этих областей. Обычно один *p-n* переход (эмиттер) включается в прямом направлении и является источником неравновесных носителей. Второй *p-n* переход (коллектор) включается в обратном направлении. Сопротивление коллектора модулируется неравновесными носителями, инжектированными из эмиттера. Центральный слой транзисторной структуры называется базой. Коэффициент усиления транзистора определяется коэффициентом переноса β , коэффициентом инжекции γ_n и коэффициентом усиления коллектора α_k (отношением изменения тока коллектора к изменению тока неосновных носителей заряда, дошедших до коллектора):

$$h_{21} = \gamma_n \times \beta \times \alpha_k \quad (2.19)$$

В «тонких» транзисторах, которые обычно используются, длина базы d намного меньше диффузионной длины пробега носителей L ($d \ll L$). В этих транзисторах незначительные изменения коэффициента усиления по току эмиттера могут вызвать очень большие изменения тока. Так как в таких транзисторах коэффициент усиления связан квадратичной зависимостью с длиной диффузионного смещения, равной:

$$h_{21} = 1 \cdot 0,5 \times \left(\frac{d}{L}\right)^2 \quad (2.20)$$

То любые воздействия на нее будут приводить к значительному изменению тока. Таким образом, на основе транзисторов возможно создание таких же приборов, основанных на управлении длиной диффузионного смещения, как и на «длинных» диодах. Роль сопротивления базы в них играет сопротивление коллекторного *p-n*- перехода, включенного в обратном направлении.

В «длинных» транзисторах ($d > 3L$) коэффициент усиления значительно меньше единицы и связан экспоненциальной зависимостью с длиной диффузионного смещения следующим выражением:

$$h_{21} \approx 2 \times \exp\left(-\frac{d}{L}\right) \quad (2.21)$$

В этих транзисторах возможно управление током путем воздействия на длину диффузионного смещения [24].

Таким образом, на основе транзисторных структур могут быть созданы приборы с высокой чувствительностью к изменениям длины диффузионного смещения и, следовательно, обладающие высокой чувствительностью к магнитному полю. Возможно создание «тонких», и «длинных» магнитотранзисторов.

«Тонкие торцевые» магнитотранзисторы обладают высокой магнитной чувствительностью только при $h_{21} \gg 1$, при условии, что отличие коэффициента переноса от единицы связано с рекомбинационными процессами. При этом коэффициент инжекции тоже близок к единице.

Вольтовая магнитная чувствительность γ_n «тонких торцевых» магнитотранзисторов будет большой при достаточно высоких рабочих напряжениях, а токовая γ_n – при любых напряжениях.

В настоящее время отсутствуют данные о «тонких торцевых» магнитотранзисторах, обладающих высокой магнитной чувствительностью. В этом отношении перспективными могут оказаться планарные транзисторы с высоким коэффициентом усиления.

В «длинных торцевых» магнитотранзисторах на коэффициент усиления сильно влияет поперечное магнитное поле вследствие уменьшения эффективной длины диффузионного смещения. Она уменьшается как из-за искривления линий тока, так и в результате уменьшения подвижности носителей заряда. Продольное магнитное поле тоже оказывает сильное влияние. Увеличивается эффективная длина диффузионного смещения, так как под воздействием сильных магнитных полей ($\mu_n B/c \gg 1$) практически все инжектированные из эмиттера неравновесные носители движутся по кратчайшему пути к коллектору параллельно оси. Их рекомбинация заметно снижается, а коэффициент усиления транзистора возрастает [24].

Магнитную чувствительность магнитотранзисторов принято связывать с тремя основными физическими механизмами:

- с эффектом отклонения носителей, обусловленным действием силы Лоренца на неосновные носители в базовой области, в обедненном слое перехода база-коллектор и в слаболегированной области коллектора МТ;
- с эффектом Холла, относящимся к любым воздействиям, создаваемым холловским электрическим полем, которое возникает под действием силы Лоренца на основные носители в базовой области МТ;
- с магнитоконцентрационным эффектом, являющимся результатом действия силы Лоренца на носители обоих типов и выражающимся в изменении концентрации носителей, необходимом для поддержания нулевого объемного заряда.

Более подробно с физическими основами и особенностями функционирования магнитотранзисторов можно ознакомиться в [6, 15, 16, 20, 24, 40, 57].

Двухколлекторные магнитотранзисторы

Для изготовления магнитотранзисторов используются все современные технологии, применяемые в производстве интегральных микросхем: биполярная эпитаксиально-планарная, МОП и др.

Двухколлекторный магнитотранзистор (ДМТ) представляет собой обычный «торцевой» биполярный p - n - p транзистор, коллектор которого разделен на две части (рис. 2.81).

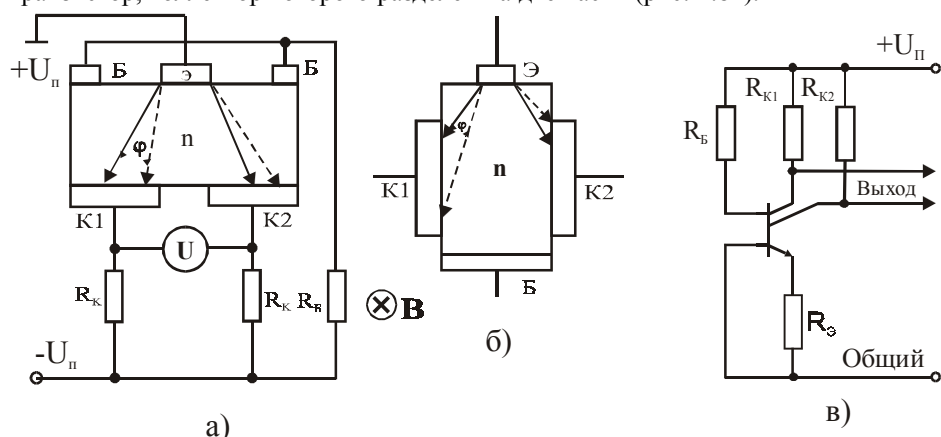


Рис. 2.81. Двухколлекторный магнитотранзистор: а, б – структура; в – схема включения

Принцип действия двухколлекторного магнитотранзистора заключается в следующем. При включении ДМТ по схеме с общим эмиттером и нагрузочными резисторами R_k в цепях коллекторов (мостовая схема) в отсутствие магнитного поля инжектированные эмиттером носители заряда (дырки) примерно поровну распределяются между коллекторами. Токи коллекторов К1 и К2 равны, и напряжение (U) между ними отсутствует. В поперечном магнитном поле B^* происходит перераспределение инжектированных носителей заряда между коллекторами, при этом ток коллектора К2 увеличивается, а ток коллектора К1 уменьшается, что вызывает разбаланс моста. Это приводит к изменению напряжения между коллекторами, причем с ростом магнитного поля оно увеличивается. При изменении направления магнитного поля (B^*) ток коллектора К2 уменьшается, а ток коллектора К1 увеличивается и соответственно изменяется знак напряжения U между коллекторами.

Наряду с указанным перераспределением инжектированных носителей заряда между коллекторами, происходит изменение эффективной толщины базы. При этом в рассмотренной конструкции в магнитном поле уменьшается эффективная толщина базы левой части транзистора, то есть ток коллектора К1 увеличивается, а ток коллектора К2 уменьшается. Этот эффект противоположен эффекту перераспределения носителей заряда и приводит к уменьшению магнитной чувствительности ДМТ [24].

Этот недостаток устраняется при использовании ДМТ с «вертикальными» коллекторами, в котором омический контакт к базе и эмиттер расположены по разные стороны от коллекторов (рис. 2.81.б). Магнитное поле, наряду с эффектом перераспределения носителей между коллекторами, уменьшает эффективную толщину базы, если ток коллектора К2 увеличивается, и соответственно увеличивает толщину базы для коллектора К1. Таким образом, изменение толщины базы дополнительно увеличивает ток коллектора К2, и уменьшает ток коллектора К1. Это приводит к росту магнитной чувствительности ДМТ.

2.4.2. Германиевые двухколлекторные магнитотранзисторы

На рис. 2.82 приведены выходные характеристики «торцевого» ДМТ, изготовленного из германия с размером кристалла 1х1х4 мм.

Вольт-амперные характеристики коллекторов транзистора (рис. 2.82.б) подобны характеристикам обычного биполярного транзистора. Вследствие некоторого различия коллекторных $p-n$ - переходов (по площади и токам утечки), их токи в отсутствие магнитного поля также несколько различаются. При воздействии магнитного поля ток одного коллектора увеличивается, а другого - уменьшается. Напряжение между коллекторами с ростом индукции магнитного поля растет и при $B > 0,7$ Тл достигает насыщения.

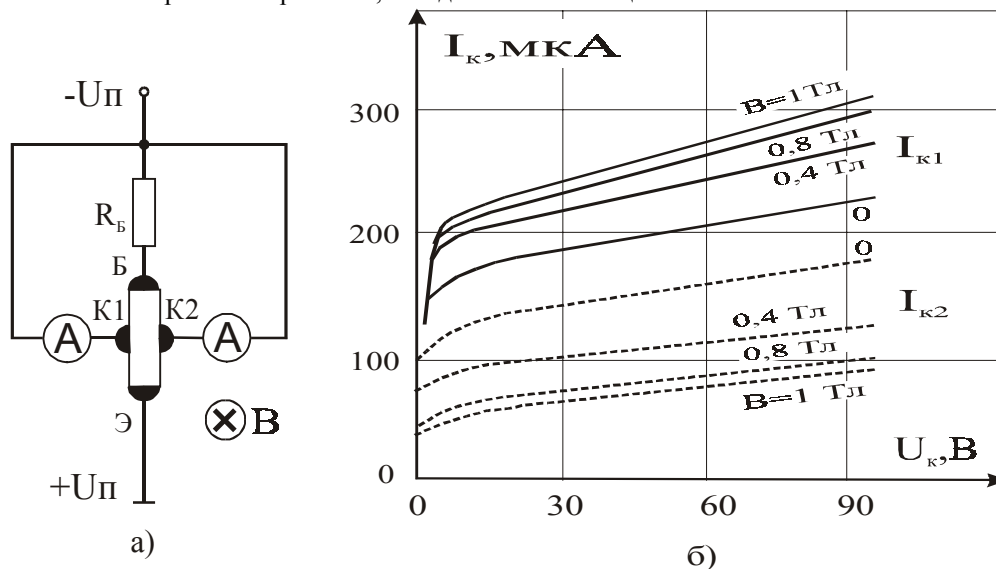


Рис. 2.82. «Торцевой» германиевый двухколлекторный магнитотранзистор: а – структура; б – статические выходные характеристики

Максимальная магнитная чувствительность и линейность характеристики магнитотранзистора наблюдаются в области слабых магнитных полей. Удельная магнитная чувствительность германиевого магнитотранзистора достигает значений $\gamma_{уд} = (2...4) \times 10^5$ В/Тл-х-А при $B < 0,4$ Тл, что на 2–4 порядка выше чувствительности элементов Холла [15, 16].

2.4.3. Кремниевые двухколлекторные магнитотранзисторы

На рис. 2.83 приведена планарная структура кремниевого планарного двухколлекторного магнитотранзистора. Роль эмиттеров и коллекторов играют диффузионные p -области. Базой служит подложка n типа, активной областью базы – область между эмиттером и коллекторами, активными участками эмиттерного и коллекторного $p-n$ переходов и их «боковые» стенки.

Структура функционирует следующим образом. При прохождении тока через участок Б2–Б1 в поперечном магнитном поле в базе появляется ЭДС-Холла, которая отклоняет носители в ту же сторону, что и сила Лоренца. Это приводит к увеличению перераспределения инжектированных носителей между коллекторами. Одновременно приложенное к контактам Б2–Б1 напряжение увеличивает электрическое поле в базе, которое и вызывает рост скорости движения носителей и, следовательно, рост силы Лоренца.

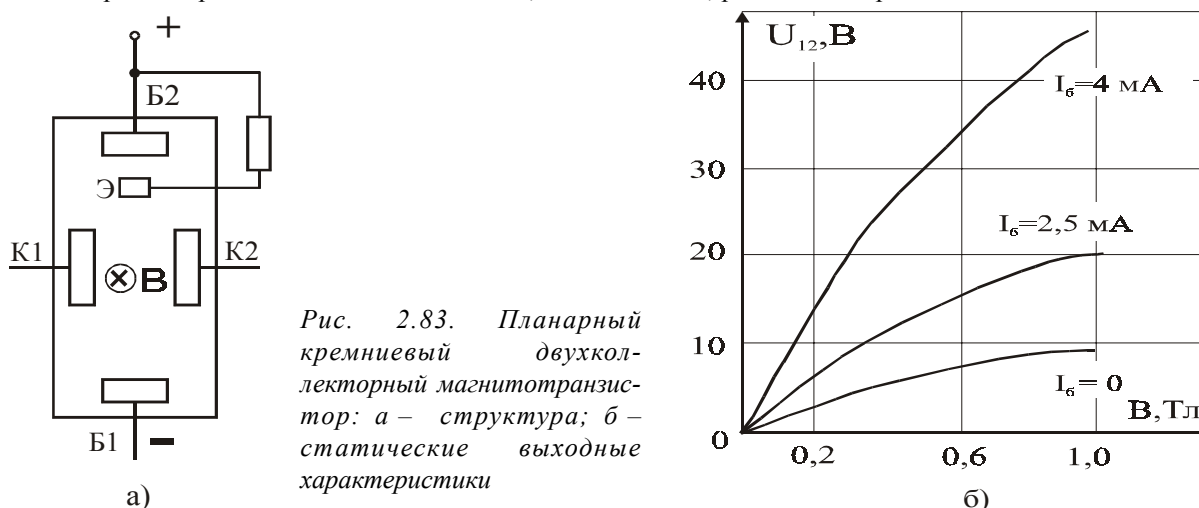


Рис. 2.83. Планарный кремниевый двухколлекторный магнитотранзистор: а – структура; б – статические выходные характеристики

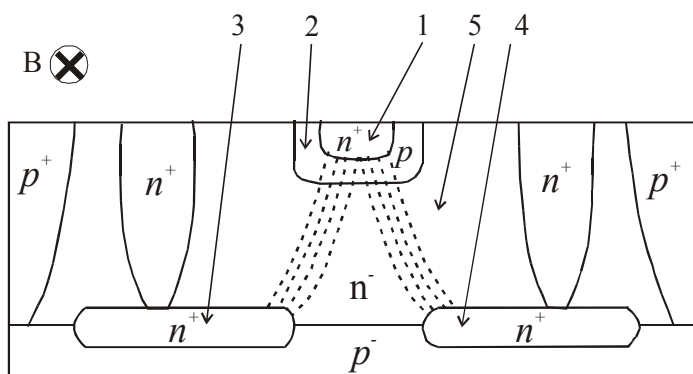
В рассмотренной структуре, изменяя ток через базовые контакты Б2, Б1, можно устанавливать необходимую напряженность электрического тока в базе. На рис. 2.83.б приведены зависимости напряжения между коллекторами планарного ДМТ от индукции магнитного поля для различных соотношений токов, протекающих через эмиттер и прилегающий базовый контакт. При постоянстве общего тока $I_{Б1} + I_{Б2}$ действие омического контакта Б2 сводится к шунтированию эмиттера и снижению его эффективности. Тем не менее, магнитная чувствительность значительно растет, так как с увеличением электрического поля в базе растет отклоняющее действие силы Лоренца на инжектированные носители заряда. При достаточно больших значениях напряженности электрического поля магнитная чувствительность уменьшается. Магнитная чувствительность такого ДМТ с дополнительным омическим контактом к базе, определенная для линейного участка, составляет около $10^5 \text{ В} / \text{Тл г А}$, что на порядок выше чувствительности такого же ДМТ, но с отключенным контактом Б2 [24, 16].

Кремниевые вертикальные магнитотранзисторы

На рис. 2.84 приведена структура двухколлекторного биполярного вертикального p - p - n магнитотранзистора.

Магнитотранзистор обладает чувствительностью к составляющей магнитного поля, параллельной поверхности кристалла.

Рис. 2.84. Структура двухколлекторного биполярного вертикального p - p - n магнитотранзистора: 1 – эмиттер; 2 – база; 3, 4 – коллекторные области; 5 – эпитаксиальная область коллектора



Структура магнитотранзистора функционирует следующим образом. Электроны, инжектируемые n^+ эмиттером 1, движутся вниз, проходя последовательно через базу 2, слаболегированную область коллектора 5, и достигают высоколегированных n^+ областей 3 и 4, выполненных в виде скрытого слоя. В отсутствие управляющего магнитного поля токи двух коллекторов 3 и 4 практически равны при условии, что структура полностью симметрична. При воздействии внешнего магнитного поля, параллельного поверхности кристалла и перпендикулярного плоскости рисунка, поток носителей (в данном случае электронов) отклоняется на угол Холла, в результате чего возникает разбаланс токов, величина и знак которого однозначно определяются величиной и направлением вектора магнитной индукции.

Относительная магнитная чувствительность (S_H) приборов такого типа достигает 10–11%/Тл, при температурном коэффициенте $-0,3\%$ на градус Цельсия.

Двухколлекторные магнитотранзисторы характеризуются линейной зависимостью выходного сигнала от напряженности магнитного поля в широком диапазоне значений магнитной индукции, чувствительностью к направлению магнитного поля и высокой реальной чувствительностью, поскольку ДМТ являются балансными приборами. Кроме того, зависимость выходных параметров от двух задаваемых извне независимых величин («тянущее» электрическое поле в базе ДМТ и от эмиттера) вместо одной из них значительно расширяет схемотехнические применения ДМТ [6, 20, 24, 69].

2.4.4. Кремниевые двухстоковые магнитотранзисторы

К магниточувствительным приборам, оригинальной конструкции можно отнести магнитотранзисторы, которые изготавливаются в едином технологическом цикле с формированием кремниевых МОП (или КМОП) интегральных схем. Они характеризуются оригинальной топологией (рис. 2.85).

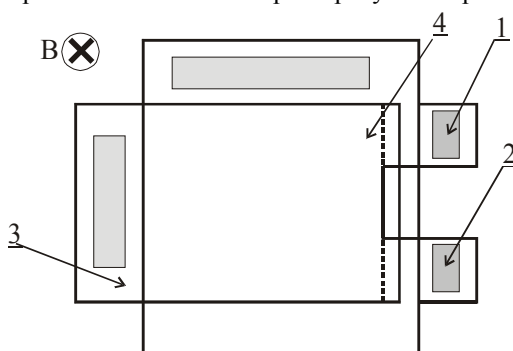


Рис. 2.85. Топология двухстокового МОП магнитотранзистора: 1, 2 – измерительные стоковые области; 3 – область истока; 4 – область канала

Наличие двух стоковых областей 1 и 2, топологически разнесенных друг от друга на небольшое расстояние (4–15 мкм) и одинаковом удаленных относительно линии симметрии структуры и области истока 3, позволяет при отсутствии магнитного поля ($B = 0$) в активном режиме работы транзистора фиксировать две равные величины стоковых областей. При воздействии управляющего магнитного поля, направленного перпендикулярно к поверхности кристалла, происходит отклонение носителей заряда в области канала МОП транзистора 4, что приводит к изменению их траектории движения и, следовательно, к увеличению тока одного из стоков относительно другого. Регистрируемый разбаланс токов стоков прямо пропорционально зависит от индукции магнитного поля, а его знак определяется направлением вектора индукции.

Относительная магнитная чувствительность (S_n) приборов такого типа составляет 4–5%/Тл. Значение удельной магнитной чувствительности $\gamma_{уд}$ для аналогичных приборов достигает 10 В/Тл \times А при температурном коэффициенте $-0,2 \dots -0,6\%$ на градус Цельсия [69, 6, 20].

2.4.5. Биполярный горизонтальный МОП p-n-p транзистор

На рис. 2.86 приведена структура биполярного *n-p-n* магнитотранзистора, изготовленного по МОП технологии.

Биполярный горизонтальный *n-p-n* магнитотранзистор (рис. 2.86) имеет n^+ область первичного коллектора 1, расположенную внутри базовой области p типа 2, а также вторичный коллектор 3, которым служит подложка n типа с кольцевой диффузионной n^+ областью. В отличие от магнитодиода он имеет два отдельных полосковых базовых контакта 4, 5, расположенных по краям базовой области 2, через которые задается ток смещения. Переход эмиттер–база смещается в прямом направлении, а переходы база–первичный коллектор и база–вторичный коллектор – в обратном направлении. На поверхности структуры располагается поликремневый электрод затвора 6, расположенный на подзатворном диэлектрике 7, на который подается отрицательное смещение относительно области базы, чтобы уменьшить рекомбинацию неосновных носителей в базовой области на границе раздела окисел кремния–кремний.

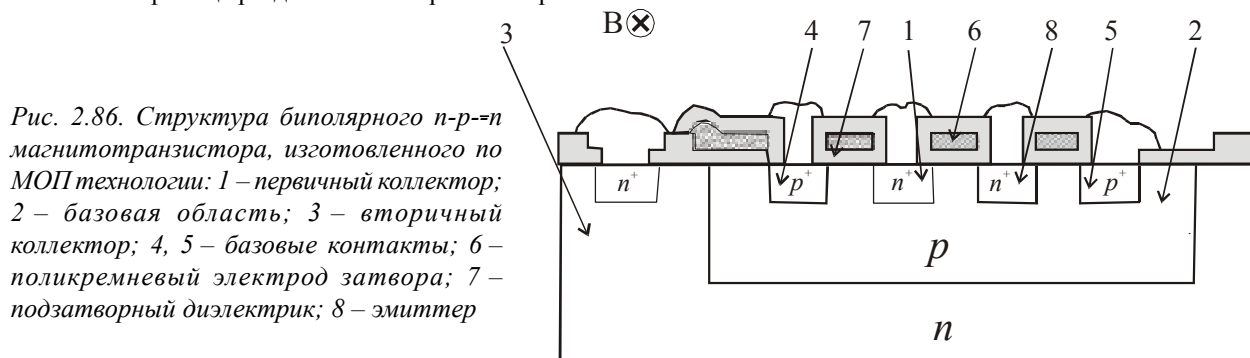


Рис. 2.86. Структура биполярного *n-p-n* магнитотранзистора, изготовленного по МОП технологии: 1 – первичный коллектор; 2 – базовая область; 3 – вторичный коллектор; 4, 5 – базовые контакты; 6 – поликремневый электрод затвора; 7 – подзатворный диэлектрик; 8 – эмиттер

При воздействии управляющего магнитного поля, параллельного поверхности кристалла, происходит отклонение электронов, инжектированных эмиттером 8 в базовую область. В результате этого изменяется соотношение токов первичного и вторичного коллекторов. В качестве измеряемой величины фиксируется изменение тока первичного коллектора.

Из-за неэквивалентности двух коллекторов чувствительность магнитотранзистора будет различной при разной полярности магнитного поля, что является недостатком данного прибора [69].

2.4.6. Полярный магнитотранзистор

По определению авторов работы [24], полярным магнитотранзистором называется прибор, у которого знак изменения выходного тока зависит от направления магнитного поля.

На рис. 2.87 представлена структура и вольтамперная характеристика магниточувствительного трехэлектродного полярного прибора [24].

Прибор изготовлен на базе магнитодиода КД304 и имеет *n-p-n* структуру. Коллектор и база по выполняемой функции эквивалентны (являются инжекторами дырок в прямосмещенных диодных структурах Б-Э и К-Э, электрически связанных с общим эмиттером).

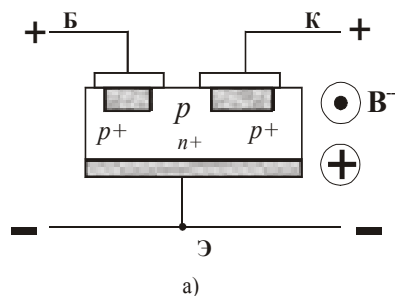
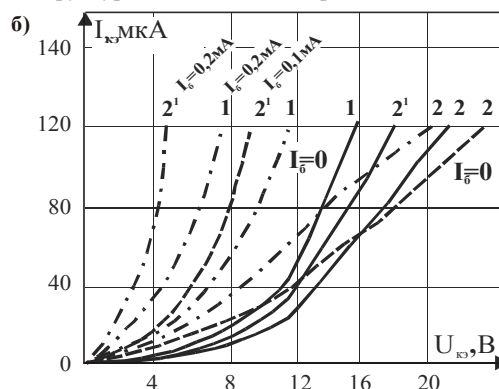
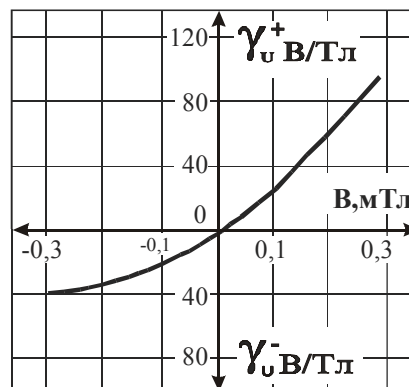


Рис. 2.87. Полярный магнитотранзистор: а – структура; б – ВАХ при различных значениях базового тока и магнитной индукции: $B = 0$; $B^+ = 0,2$ Тл; $B^- = 0,2$ Тл



В отсутствие магнитного поля с ростом базового тока I_6 падение напряжения $U_{к-э}$ уменьшается за счет введения в базовую область между К и Э из базового контакта дополнительных носителей заряда. При воздействии управляющего магнитного поля и при $I_6 = 0$ наблюдается рост падения напряжения, обусловленный магнитодиодным эффектом. При этом в направлении B^+ падение напряжения больше, чем в направлении B^- . Это можно объяснить магнитодиодным эффектом и наличием захвата дырок обедненной областью у контакта металл–полупроводник.

Рис. 2.88. Зависимость вольтовой магнитной чувствительности полярного магнитотранзистора от индукции магнитного поля при $I_6 = 0,2 \text{ мА}$ и $I_{к-э} = 120 \text{ мкА}$



На рис. 2.88 приведена зависимость вольтовой магнитной чувствительности полярного магнитотранзистора от индукции магнитного поля. В магнитном поле с B^- при $I_6 \neq 0$ отклоняющиеся носители зарядов обогащают базовую область с между Э и К носителями заряда и тем самым уменьшают сопротивление этой области. При этом сопротивление оказывается значительно меньше, чем при $I_6 = 0$. При значениях $I_6 \neq 0$ напряжение $U_{к-э}$ уменьшается, появляется полярная магниточувствительность, которая с ростом тока I_6 вначале возрастает, а затем достигает насыщения. Таким образом, полярная магниточувствительность управляется током базы I_6 . С ростом индукции управляющего магнитного поля чувствительность в поле B^+ возрастает по линейному закону, а в поле B^- она меньше и с увеличением индукции стремится к насыщению [24].

2.4.7. Однопереходные магнитотранзисторы

Однопереходный магнитотранзистор представляет собой трехэлектродный прибор с одним $p-n$ переходом, расположенным между двумя омическими контактами (рис. 2.89).

Переход $p-n$ включается в прямом направлении и создает неравновесную проводимость, которая зависит от индукции управляющего магнитного поля. В обеих цепях однопереходного магнитотранзистора существуют области отрицательного сопротивления: в цепи эмиттер – база S типа, в цепи база–база N типа.

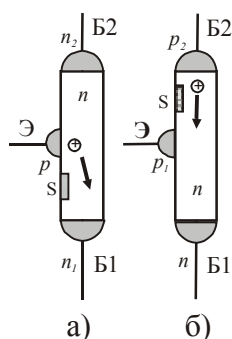
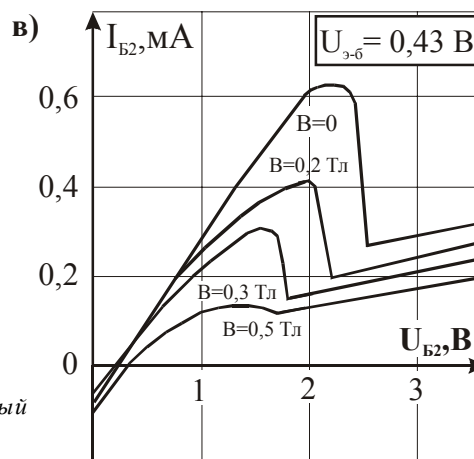


Рис. 2.89. Симметричный однопереходный магнитотранзистор: а, б — структуры; в — ВАХ



Однопереходные магнитотранзисторы называются симметричными, когда $p-n$ переход расположен в середине межбазовой (Б1-Б2) области, и несимметричными, когда $p-n$ переход смещен. Если в обычных транзисторах отношение d/L имеет минимальное значение для обеспечения наилучших переключающих свойств, то в однопереходном магнитотранзисторе это отношение должно быть достаточно большим для проявления магнитодиодного эффекта [15, 24].

На рис. 2.89.в приведено семейство ВАХ база–база симметричного однопереходного магнитотранзистора. Инжекцию носителей можно создать из какого-либо базового контакта. В такой конструкции (рис. 2.89.б) основным зависящим от магнитного поля параметром будет $U_{вкл}$.

Инжектированные из прямосмещенного базового $p-n$ перехода (Б2), носители заряда будут достигать центрального $p-n$ перехода и изменять его ток насыщения. Если переход включен в обратном направлении, то его ток полностью определится концентрацией дошедших до него неосновных носителей, инжектированных из базового $p-n$ перехода. Инжекцией из базового $p-n$ перехода можно модулировать сопротивление нижней части базы, тем самым; уменьшая $U_{вкл}$.

В магнитном поле, отклоняющем инжектированные из базового $p-n$ перехода носители к области с высокой скоростью рекомбинации, исходное сопротивление базы растет, что приводит к увеличению $U_{вкл}$. В противоположном направлении магнитного поля $U_{вкл}$ уменьшается [15, 24].

2.4.8. Многоколлекторные и многостокные магнитотранзисторы

Расширение функций, реализуемых магнитоэлектронными устройствами, привело к необходимости разработки нового поколения магниточувствительных элементов. Такие МЧЭ должны регистрировать магнитные поля, действующие в двух или трех ортогональных направлениях.

Для получения магниточувствительных структур с расширенными функциональными характеристиками, наряду со стандартными технологиями микроэлектроники (биполярная, МОП и т.п.), используют менее распространенные интегральные технологии: «кремний на изоляторе», МОП технология с двойной диффузией (ДМОМ), технологии, основанные на формировании инжекционно-полевых и PL-структур и др.

На рис. 2.90 приведена структура прибора, предназначенного для регистрации трех (X,Y,Z) пространственных компонент магнитного поля. Прибор изготовлен по ДМОМ технологии.

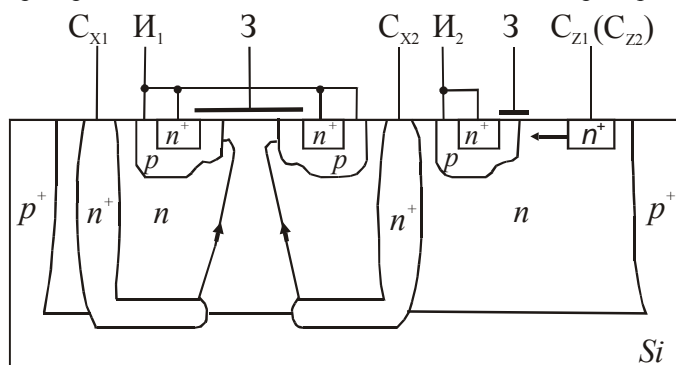


Рис. 2.90. Поперечное сечение структуры трехмерного прибора: C_{X1} , C_{X2} и C_{Z1} , C_{Z2} – измерительные стоки вертикального и горизонтального ДМОМ магнитотранзисторов соответственно; 3 – электрод затвора; I_1 и I_2 – истоковые области ДМОМ магнитотранзисторов

Структура прибора, рассмотренная на рис. 2.90, представляет собой несколько магнитотранзисторов, объединенных в одном интегральном устройстве.

Для измерения компоненты вектора магнитной индукции, направленной перпендикулярно поверхности кристалла, используется один горизонтальный двухстоковый ДМОМ транзистор с индуцированным каналом n типа проводимости.

Измерение двух других составляющих магнитного поля, параллельных поверхности кристалла, осуществляется двумя ортогонально расположенными вертикальными ДМОМ транзисторами, каждый из которых имеет две (C_{X1} , C_{X2}) заглубленные (выполненные на основе скрытого p^+ слоя) области стока.

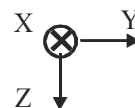
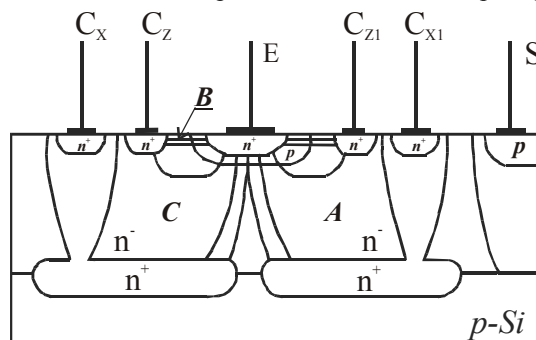
Для реализации трехмерного прибора использовался эпитаксиальный слой n типа толщиной 16 мкм, сформированный на кремниевой подложке p типа.

Чувствительность прибора к тангенциальной составляющей магнитного поля достигается за счет отклонения силой Лоренца электронов, инжектированных из p^+ области истока I_1 и двигающихся за счет тянущего поля через канал ДМОМ транзистора, а затем вниз через слаболегированный эпитаксиальный слой, и в конечном счете достигающих двух симметрично расположенных заглубленных областей стоков C_{X1} , C_{X2} . Разбаланс этих токов, вызванный воздействием управляющего магнитного поля, линейно зависит от индукции поля и является полезным сигналом.

В горизонтальном двухстоковом ДМОМ транзисторе, инжектированные истоком I_2 , движутся за счет тянущего поля параллельно поверхности кристалла и равномерно распределяются между двумя симметричными стоками C_{Z1} , C_{Z2} в отсутствие нормальной составляющей магнитного поля относительно поверхности кристалла. При воздействии этой составляющей происходит перераспределение тока электронов между стоковыми областями C_{Z1} , C_{Z2} , возникающая при этом величина разбаланса токов стоков является мерой напряженности магнитного поля [69].

С. Кордичем [37] приведен еще один вариант полупроводниковой структуры, предназначенной для регистрации трех составляющих магнитного поля. На рис. 2.91 показано поперечное сечение этого прибора.

Рис. 2.91. Структура трехкомпонентного p-p-n магнитотранзистора: пары коллекторов C_X и C_Y , чувствительных к магнитным полям в плоскости кристалла (B_X и B_Y); C_{Z1} и C_{Z2} и две Z – коллекторные пары (C_Z и C_{Z2} и C_{Z1} и C_{Z3}), которые используют горизонтальные компоненты тока коллектора для определения B_Z (симметричные коллекторные пары C_Z и C_{Z2} и C_{Z1} и C_{Z3} на рисунке не показаны; см. [37])



В сущности, прибор является двухразмерным вертикальным магнитотранзистором, объединенным с одномерным горизонтальным магнитотранзистором.

Вертикальная компонента (А) тока коллектора чувствительна к B_x и B_y . Горизонтальная компонента (В) тока используется для определения B_z . Ток, достигающий Z – канала (коллекторы C_z), не является полностью горизонтальным, но, существует, и вертикальная компонента (С), ответственная за чувствительность Z – канала B_y .

Z – канал трехразмерного датчика чувствителен не только к Z – составляющей магнитного поля, но также, и к Y – составляющей управляющего поля. Это можно объяснить тем же образом, что и паразитную чувствительность горизонтальных магнитотранзисторов к одной компоненте поля в плоскости. Эта так называемая поперечная чувствительность вызвана компонентами тока, которые содержат как вертикальные, так и горизонтальные компоненты потока (рис. 2.91).

Если датчик трехразмерный, то наличие поперечной чувствительности не является какой-либо помехой, поскольку там имеется три канала, так, что три компоненты поля могут быть выделены посредством инвертирования чувствительной матрицы.

Одним из преимуществ такой конструкции является то, что пространственная разрешающая способность измерения ($8 \times 10 \times 20$ мкм) гораздо выше, чем та разрешающая способность, которая может быть получена при помощи двухразмерного вертикального транзистора и одномерного горизонтального, объединенных, фактически, друг с другом.

2.4.9 Комбинированный преобразователь магнитного поля

В интегральных элементах Холла и магнитотранзисторах среди выявленных недостатков наиболее существенными являются большая величина и нестабильность начального напряжения (U_0 или DU_0 при $B = 0$) и значительный температурный коэффициент магнитной чувствительности.

В целях улучшения эксплуатационных характеристик авторы работы [6] предложили вариант, комбинированного преобразователя магнитного поля (КПМП).

Конструкция КПМП представляет собой гибрид биполярного магнитотранзистора и элемента Холла на основе инверсного слоя канала n МОП транзистора. Преобразователь изготавливался по типовой МОП технологии.

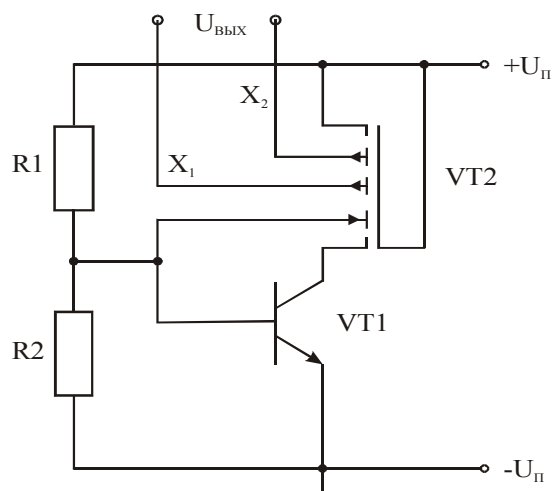


Рис. 2.92 Электрическая схема комбинированного преобразователя магнитного поля

На рис. 2.92 показана электрическая схема КПМП в одном из вариантов ее включения в измерительную схему. Схемотехнически это биполярный транзистор с активной нагрузкой в виде n МОП транзистора с дополнительными контактами X1 и X2.

Топология преобразователя приведена на рис. 2.93 и представляет собой МОП элемент Холла с нетрадиционным расположением токовых омических контактов. Роль истокового контакта играет эмиттер, удаленный от коллектора на расстояние не более диффузионной длины неосновных носителей в базовой области, а контакт к подложке МОП -транзистора является источником тока базы.

Эмиттер имеет низкий уровень инжекции, а напряжение коллектор–эмиттер выше напряжения база–эмиттер. Напряжение питания $U_{п}$ составляет величину, большую, чем напряжение прямосмещенного p-n перехода база–эмиттер плюс пороговое напряжение n МОП -транзистора.

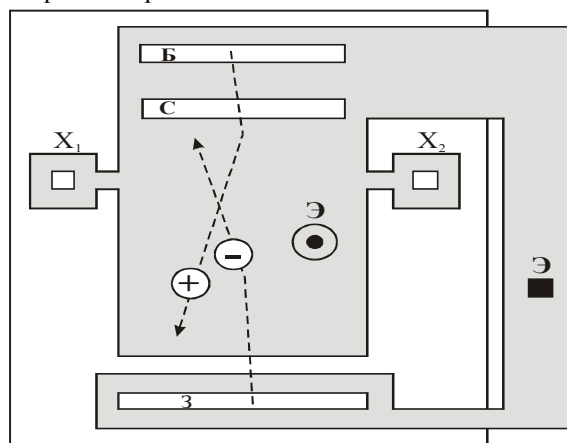


Рис. 2.93. Вариант топологии комбинированного преобразователя магнитного поля: Б – база; Э – эмиттер; З – затвор; X₁ и X₂ выходные контакты

Начальное напряжение $U_{\text{бз}}$ задается отношением $R1/R2$, исходя из минимального значения температурного коэффициента магнитной чувствительности.

Принцип работы комбинированного преобразователя магнитного поля заключается в следующем.

Дырки, двигаясь по области базы, в качестве которой служит карман МОП-транзистора, под действием магнитного поля, перпендикулярного поверхности кристалла, отклоняются к одной из сторон вытянутого эмиттера (рис. 2.93), вызывая при этом модуляцию его инжекции. Электроны, инжектированные в неодинаковых количествах с разных сторон эмиттера, коллектируются инверсионным слоем, образованным под областью затвора, и, двигаясь по тонкому каналу к стоку, под действием того же самого магнитного поля отклоняются к области одного из холловских контактов, находящегося на стороне у края эмиттера с повышенной инжекцией носителей заряда, в результате чего между контактами X1 и X2 возникает усиленное предыдущими двумя эффектами напряжение Холла.

Вследствие того, что электроны в инверсный канал попадают не через токовый контакт, как в обычном элементе Холла, а из инжектирующего эмиттера, с ростом температуры спад подвижности носителей заряда компенсируется ростом их инжекции из эмиттера. Задав изначально оптимальное значение напряжения $U_{\text{бз}}$, можно получить малое значение температурного коэффициента чувствительности.

Магнитотранзистор имеет лишь один коллектор, следовательно, величина начального разбаланса (ΔU_0) должна быть минимальной.

Параметры комбинированного преобразователя магнитного поля выглядят следующим образом..

При напряжении питания 9 В. ток эмиттера составил 303 мкА, а ток коллектора – 183 мкА.

Напряжение база–эмиттер задавалось отношением резисторов $R1/R2$. Потенциал в области холловских контактов, измеренный относительно общего эмиттера, составлял величину примерно равную $U_{\text{и}}/2$. Величина магнитной чувствительности, измеренная при температуре 20 °С, составила 72,4 мВ/мТл.

Выходная характеристика преобразователя в диапазоне рабочих температур от 20 до 100 °С и при трех значениях отношений $R1/R2$ представлена на рис. 2.94.

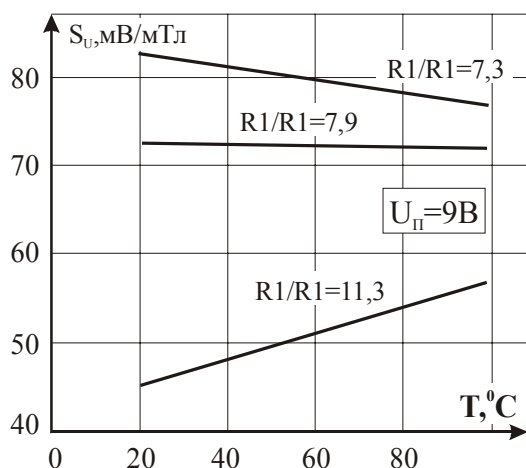


Рис. 2.94. Выходная характеристика комбинированного преобразователя магнитного поля

С ростом температуры до 100 °С ток эмиттера возрастал до 427 мкА, но при этом температурный коэффициент абсолютной магнитной чувствительности составил примерно 0,01% на градус Цельсия. Значение начального разбаланса в виде остаточно-эквивалентной индукции составило в, 15–20 мТл, а изменение начального разбаланса – 0,1% на градус Цельсия.

Обычный элемент Холла на основе n-МОП транзистора такой же конфигурации и при таком же токе потребления имел значение магнитной чувствительности 65 В/Тл при температурном коэффициенте 0,3% на градус Цельсия. Величина остаточно-эквивалентной индукции составляла 20–25 мТл.

Удельная магнитная чувствительность комбинированного преобразователя при температуре 20 °С составила 240 В/Тл × А при температурном коэффициенте примерно 0,01% на градус Цельсия [6].

Промышленное производство и образцы магнитотранзисторов

В Советском Союзе исследования в области разработки магнитотранзисторов проводились в ОГУ, ЛЭТИ им. Ульянова (Ленина), МИЭТе, ИС АН ГрССР, ИФ АН ЛитССР, ВНИИЭП и др.

Однако серийное производство магнитотранзисторов в СССР практически не осуществлялось.

За рубежом исследовательские работы по изучению проблем создания магнитотранзисторов проводятся в Швейцарии (фирма LGC Kandis and Gurzug Corporation), в Голландии (фирма Philips и Дельфский технологический университет), в Канаде (фирма ISI Logic Corporation и Альбертский университет), в Болгарии (Геотехническая лаборатория), в ФРГ (Штутгартский университет), в Японии (Togohashi University of Technology), в США (Университет Хапкинса), в Венгрии (National Institute for Research and Development in Microtechnologies) и др.

Зарубежными ведущими производителями выпускаются и дискретные магнитотранзисторы. Однако, большая часть производимых, магнитотранзисторов, является элементами современных магниточувствительных и магнитоуправляемых интегральных микросхем, и поставляются они в составе указанных ИС.

Из известных отечественных образцов интерес представляет ферромагнитотранзистор типа М2АПК0522, разработанный ВНИИЭП [60].

Основные параметры магнитотранзистора М2АПК0522:

Диапазон индукции регистрируемых магнитных полей до 1 Тл

Токовая магнитная чувствительность:

на пределе +0,03 Тл.....1000 мкА/Тл

в диапазоне от +0,03 до 1 Тл.....500 мкА/Тл

Температурный коэффициент чувствительности, не более. 0,5% на градус С

Номинальный ток потребления, не более.....1,0 мА

Диапазон рабочих температур..... от -60 до +100 °С

Магнитотранзистор типа М2АПК0522 предназначен для использования в различных датчиках в качестве магниточувствительного элемента.

Он размещается в стандартном 8-выводном корпусе типа 2103-8, на ситалловой подложке которого укреплен кристалл магнитотранзистора с ферритовым концентратором магнитного потока. Полезный сигнал выделяется в виде разности коллекторных токов.

2.4.10. Применение магнитотранзисторов

По мере дальнейшего освоения и увеличения серийного производства, дискретные магнитотранзисторы найдут широкое применение в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках: скорости и направления вращения, угла поворота и преобразователях типа «угол-код», датчиках уровня, в бесконтактной клавиатуре ПЭВМ, бесконтактных реле предельного тока, регуляторах электрической мощности. Они могут использоваться: в бытовой электронной аппаратуре, системах автоматического управления, устройствах считывания информации, электронных и электрифицированных игрушках, в магнитной дефектоскопии, в биологии и медицине и др.

Интегральные магнитотранзисторные структуры используются и будут использоваться в составе современных магниточувствительных и магнитоуправляемых ИС, а также в высокочувствительных интеллектуальных магнитных датчиках.

Современная групповая технология ИС позволяет выпускать интегральные преобразователи магнитного поля на основе магнитотранзисторов, которые могут формироваться как в линейные, так и в матричные магниточувствительные структуры с различным способом их организации.

Основное назначение таких приборов – это использование их в системах визуализации магнитного поля и устройствах считывания информации с магнитных носителей (лент, карт и т.п.).

Подробнее о способах организации многоканальных и многоэлементных магниточувствительных структур и о возможных областях их применения см. в главах 4 и 6.

Особенности применения

При использовании магнитотранзисторов необходимо учитывать те же требования и условия, которые характерны для других типов преобразователей магнитного поля, и те, которые указаны в нормативно-технической документации.

Схемы включения магнитотранзисторов

Схему включения магнитотранзисторов выбирают исходя из конкретных условий применения и, как правило, индивидуально для каждого типа приборов.

На рис. 2.95 приведена без объяснений простейшая схема включения магнитотранзистора.

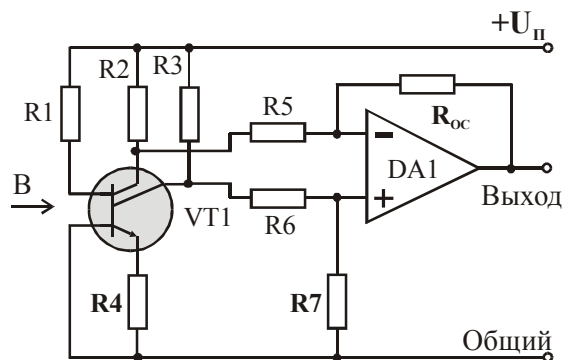


Рис. 2.95. Простейшая схема включения двухколлекторного магнитотранзистора на вход операционного усилителя

Дополнительную информацию см. в [6, 15, 16, 19, 20, 24, 37, 59, 60, 69].

2.5. Магнитотиристоры

Любой тиристор можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из двух транзисторов, поэтому магниточувствительные свойства тиристоров характеризуются магниточувствительными свойствами составляющих их транзисторов. Напряжение включения тиристора $U_{\text{вкл}}$ выражается через коэффициенты передачи по току h_{21}^1 и h_{21}^2 двух транзисторов [17, 24]:

$$U_{\text{вкл}} = U_{\text{пр}} \times \sqrt{[1 - h_{21}^1 \times (1 + I_y / I_{\text{вкл}}) - h_{21}^2]} \quad (2.22)$$

где $U_{\text{пр}}$ – напряжение лавинного пробоя коллекторного pn -перехода;

$I_{\text{вкл}}$ – ток включения;

I_y – ток управления;

h_{21}^1 – коэффициент передачи по току первого транзистора;

h_{21}^2 – коэффициент передачи по току второго транзистора;

На рис. 2.96 приведена структура магнитотиристора. Управляющий электрод $У$, присоединенный к базе, одновременно является областью, в которой рекомбинируют инжектированные из анода A дырки. В этом случае при направлении B^+ магнитного потока h_{21}^2 уменьшается, следовательно, $U_{\text{вкл}}$ увеличивается. При противоположном направлении магнитного поля (B^-) h_{21}^2 увеличивается, $U_{\text{вкл}}$ уменьшается.

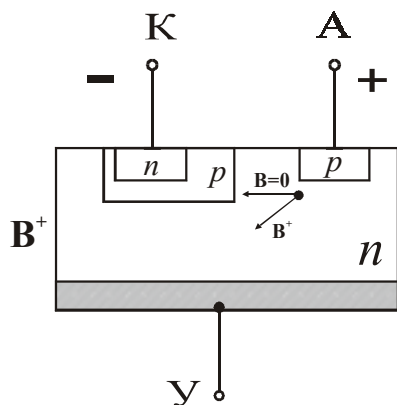
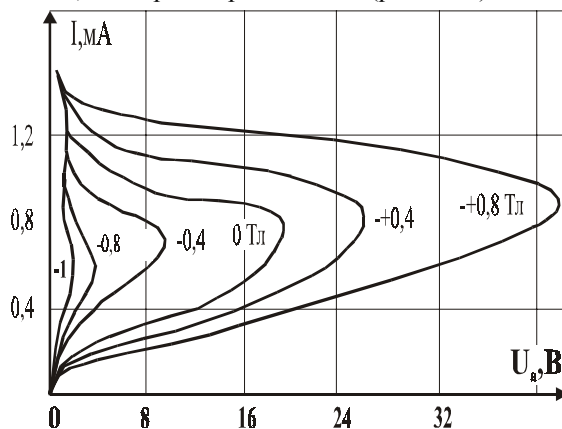


Рис. 2.97. Вольтамперная характеристика магнитотиристора с управляющим электродом к «длинной» базе при $U_{\text{ав}} = 0,67 \text{ В}$ при различных значениях индукции управляющего магнитного поля

Обычно управляющий электрод тиристора работает в режиме генерации тока. При включении управляющего электрода в режиме генерации можно дополнительно повысить магнитную чувствительность прибора. Поперечное магнитное поле приводит к искривлению траекторий движения инжектированных дырок и увеличению сопротивления диода $A-U$ (магнитодиодный эффект). Следовательно, управляющий ток снижается, что приводит к уменьшению h_{21}^2 (направление B^+) и увеличению $U_{\text{вкл}}$.

При обратном направлении магнитного потока B^- изменения управляющего тока и h_{21}^2 противоположны и магнитная чувствительность меньше, чем при направлении B^+ (рис. 2.97).



Напряжение включения $U_{\text{вкл}}$ тиристора в слабых магнитных полях изменяется почти линейно при обоих направлениях управляющего магнитного поля.

На рис. 2.98 приведена топология *сдвоенного магнито-тиристора*, представляющего собой два тиристора с общим анодом и базой.

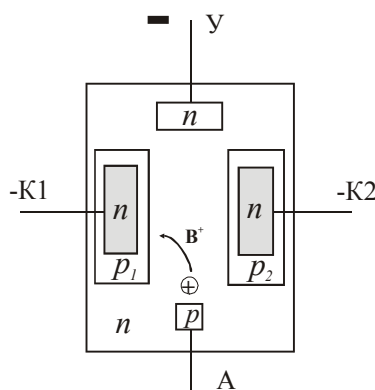


Рис. 2.98. Топология сдвоенного магнито-тиристора

Если внешнее напряжение меньше $U_{\text{вкл}}$ тиристоров в отсутствие магнитного поля, то при этом оба тиристора выключены, в магнитном поле B^+ инжектированные анодом А дырки отклоняются к коллектору К1. При этом $U_{\text{вкл}}$ левого тиристора уменьшается, и он включается. От анода к катоду К1 начинает поступать ток.

При противоположном направлении магнитного поля (B^-) дырки отклоняются к правому коллектору К2. При этом левый тиристор выключается, а правый – включается, и ток течет от анода к катоду К2.

Описанные выше тиристоры изготавливаются по обычной планарной технологии на кремнии n типа, размер кристалла 3 x 3 x 0,6 мм [24].

Дискретные магнито-тиристоры не нашли широкого применения и обычно используются в интегральных магнитных датчиках.

2.6. ГМР преобразователи

Гальваномагниторекомбинационный преобразователь (ГМР) представляет собой полупроводниковый резистор, управляемый магнитным полем. Принцип действия ГМР преобразователя основан на использовании магнитоконцентрационного эффекта, который заключается в изменении средней концентрации носителей заряда в полупроводнике при воздействии продольного и (или) поперечного магнитного поля.

Гальваномагниторекомбинационный эффект проявляется в полупроводниках с проводимостью близкой к собственной. Подробнее см. [15, 24, 50, 57, 59, 67].

Специфические термины и определения основных параметров ГМР преобразователей приведены в табл. 2.11.

Таблица 2.11. Специфические термины и определения основных параметров ГМР преобразователей

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение	Единица измерения	Определение
Выходной сигнал	$U_{\text{вых}}$	В	Представляет собой разность выходных напряжений $\Delta U = U_{\text{вых}} = U_B - U_0$, где U_B – напряжение на выходе ГМР-элемента при номинальном значении индукции магнитного поля; U_0 – напряжение на выходе ГМР-элемента при отсутствии магнитного поля.
Номинальный рабочий ток	$I_{\text{ном}}$	мА	Это ток при котором гарантируются параметры ГМР, указанные в паспорте на прибор. Определяется из выражения: $I_{\text{ном}} = U_{\text{пит}} / (R_H + R_r)$, где $U_{\text{пит}}$ – напряжение питания цепочки $R_H + R_r$; R_r – сопротивление ГМР-элемента при $B = 0$; R_H – сопротивление нагрузки.
Магнитная чувствительность	$\gamma_{\text{мг}}$	В/Тл (мВ/мТл)	Представляет собой отношение: $\gamma_{\text{мг}} = U_{\text{вых}} / B$ (при $I_{\text{ном}} = \text{const}$), где B – индукция управляющего магнитного поля.
Температурный коэффициент чувствительности	$\text{ТК}\gamma$	%/°С	Коэффициент, определяемый по формуле: $\text{ТК}\gamma = (100/\gamma_{T_0}) * (\Delta\gamma/\Delta T)$, где γ_{T_0} – магнитная чувствительность при нормальной (комнатной) температуре; $\Delta\gamma$ – изменение чувствительности; ΔT – изменение температуры. Значение $\text{ТК}\gamma$ зависит от отношения R_r/R_H

На рис. 2.99 показаны варианты конструкций ГМР преобразователей.

ГМР преобразователь представляет собой пластинку, изготовленную из полупроводникового материала, в которой выделена область с большой скоростью рекомбинации носителей заряда. При воздействии магнитного поля на эту область происходит изменение сопротивления ГМР элемента.

Воздействие магнитного поля одной полярности приводит к увеличению сопротивления ГМР элемента. Изменение полярности магнитного поля вызывает возрастание сопротивления элемента.

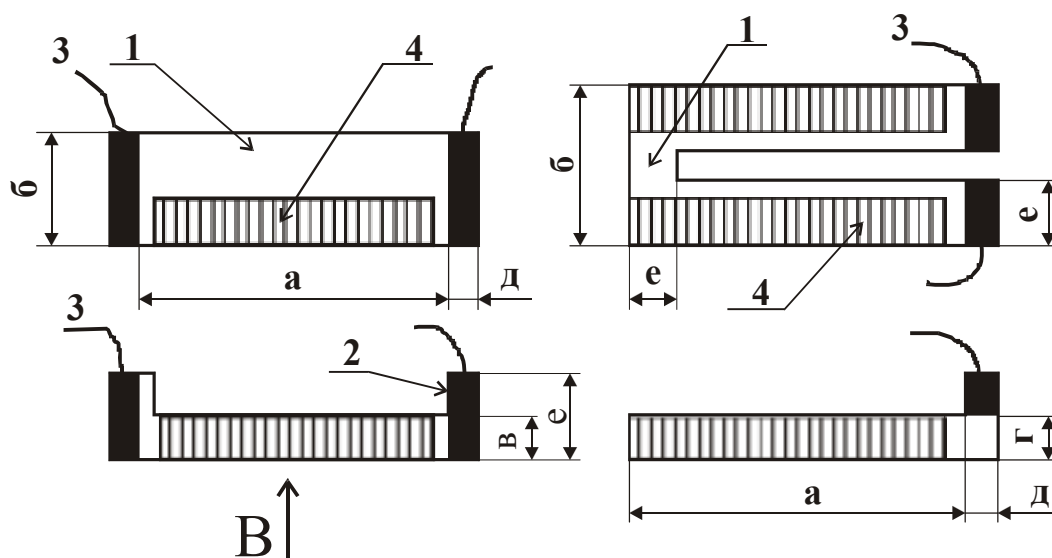


Рис. 2.99. Конструкции ГМР-преобразователей: 1 – полупроводниковая пластина; 2 – контакты; 3 – выводы; 4 – область с большой скоростью рекомбинации

Чаще всего для изготовления ГМР преобразователей используется германий, обладающий высокой подвижностью и длиной диффузионного смещения около 1 мм. В принципе, для этих целей могут быть использованы и другие полупроводниковые материалы. Однако в большинстве случаев они обладают либо недостаточно высокой подвижностью носителей заряда (как, например, кремний), либо очень малой длиной диффузионного смещения (например, у антимонида индия длина диффузионного смещения около 1 мкм), что создает большие трудности при изготовлении ГМР преобразователей.

Геометрические размеры преобразователей, разработанных Институтом физики полупроводников АН Литовской ССР, приведены в табл. 2.12 [67].

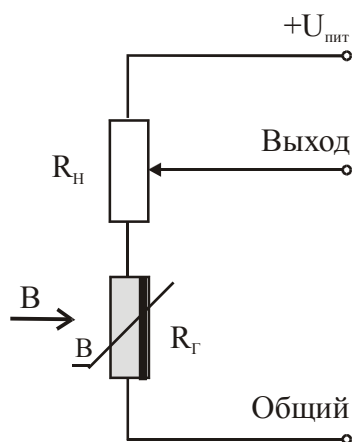


Таблица 2.12. Геометрические размеры ГМР преобразователей

Тип преобразовате	Размеры, мм (по рис. 2.99)					
	а	б	в	г	д	е
ГМР-1	10	0,5	0,2	0,15	0,5	-
ГМР-2	5	0,5	0,15	0,15	0,5	-
ГМР-3	2	0,5	0,15	0,15	0,5	-
ГМР-4	10	1,5	0,15	0,15	1	0,6
ГМР-5	6	1,5	0,15	0,15	1	0,6

На рис. 2.100 приводится схема включения ГМР-преобразователя.

Режим работы ГМР преобразователя определяется значением сопротивления нагрузки R_H . Если сопротивление нагрузки R_H в 10 раз превышает сопротивление преобразователя R_G , то последний работает в режиме питания от источника тока ($I_{уп} = \text{const.}$). В этом режиме обеспечивается максимальная чувствительность ГМР преобразователя.

Электрические параметры ГМР преобразователей в режиме максимальной магнитной чувствительности приведены в табл. 2.13, а электрические параметры преобразователей в режиме минимальной температурной зависимости магнитной чувствительности даны в табл. 2.14. На рис. 2.101 приведены выходные характеристики преобразователей типа ГМР-4.

Анализ характеристик, приведенных на рис. 2.101, показывает, что зависимость напряжения на выходе ГМР от магнитной индукции линейна в широком диапазоне изменения индукций (± 80 мТл) управляющего магнитного поля (рис. 2.101.а). При изменении тока управления от заданного значения в пределах $\pm 50\%$ выходное напряжение изменяется почти линейно (рис. 2.101.б). При оптимальном сопротивлении нагрузки выходной сигнал остается почти неизменным в достаточно широком диапазоне температур (рис. 2.101.в). Разброс значений электрических параметров, приведенных в табл. 2.12 и 2.13, составляет $\pm 30\%$.

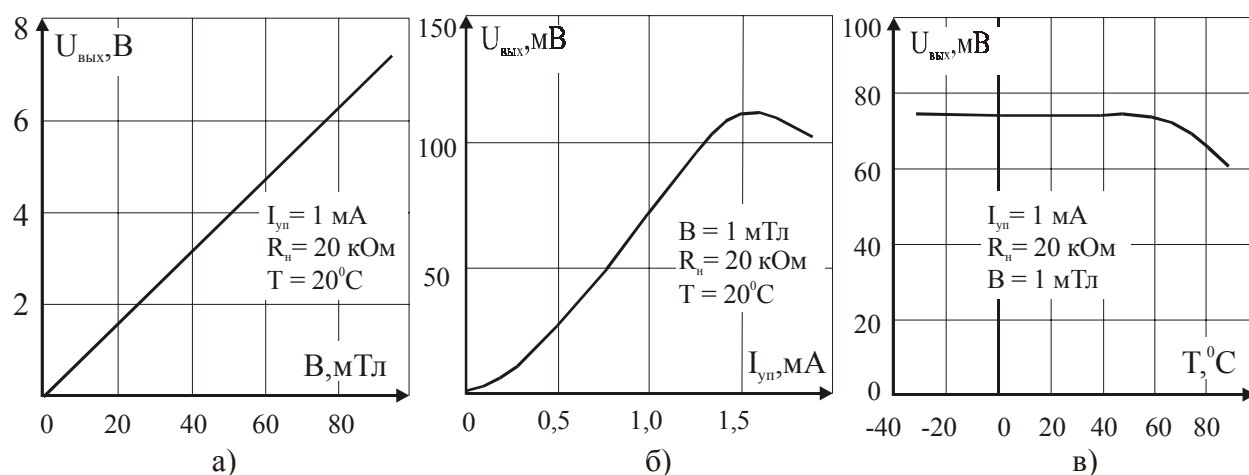


Рис. 2.101. Зависимость величины сигнала на выходе преобразователя типа ГМР-4 от: а – магнитной индукции; б – тока управления; в – температуры

Таблица 2.13. Электрические параметры преобразователей типа ГМР-1 – ГМР-5 в режиме максимальной магнитной чувствительности

Тип преобразователя	Входное сопротивление, $R_{\text{и}}$, кОм	Сопротивление нагрузки, $R_{\text{н}}$, кОм	Рабочий ток, $I_{\text{ном}}$, мА	Магнитная чувствительность, В/Тл	Температурный коэффициент чувствительности, %/градус
ГМР-1	20	200	1	80	2
ГМР-2	15	150	0,8	50	2
ГМР-3	5	100	0,8	20	2
ГМР-4	50	200	1	10	2
ГМР-5	25	200	1	6	2

Таблица 2.14. Электрические параметры преобразователей типа ГМР-1 – ГМР-5 в режиме минимальной температурной зависимости магнитной чувствительности

Тип преобразователя	Входное сопротивление, $R_{\text{и}}$, кОм	Сопротивление нагрузки, $R_{\text{н}}$, кОм	Рабочий ток, $I_{\text{ном}}$, мА	Магнитная чувствительность, В/Тл	Температурный коэффициент чувствительности, %/градус
ГМР-1	20	8	1	60	0,2
ГМР-2	15	6	0,8	38	0,2
ГМР-3	5	2	0,8	16	0,2
ГМР-4	50	20	1	75	0,2
ГМР-5	25	10	1	45	0,2

В Кишиневском научно-исследовательском институте электроприборостроения НПО «Микропровод» на базе технологии изготовления литого микропровода из германия была разработана конструкция ГМР преобразователя, отличающаяся простотой и низкой себестоимостью.

Основные параметры опытных образцов ГМР преобразователей следующие: длина активной части около 4 мм при диаметре 1 мм, магнитная чувствительность не менее 2 В/Тл при токе управления 1 мА, температурный коэффициент чувствительности в диапазоне температур $+40...+80^\circ\text{C}$ составляет 0,3–0,7% на градус Цельсия [50, 67].

Достоинством ГМР-преобразователей является высокая линейность в слабых магнитных полях, что выгодно отличает их от магниторезисторов. Кроме того, магнитная чувствительность ГМР-преобразователей оказывается значительно выше, чем чувствительность элементов Холла.

Однако, несмотря на это, порог чувствительности ГМР преобразователей имеет примерно тот же порядок, что и порог чувствительности большинства элементов Холла. Это объясняется значительной нестабильностью нулевого сигнала, связанной с изменением сопротивления ГМР.

К недостаткам ГМР преобразователей можно отнести и высокую трудоемкость их изготовления.

В СССР ГМР преобразователи производились ограниченными партиями. Они использовались в миллitesламетрах Ф4356. Сведений о их серийном производстве в России не имеется.

При условии организации промышленного производства ГМР-преобразователи могли бы использоваться для регистрации слабых магнитных полей и в качестве МЧЭ для различных функционально-ориентированных датчиков.

2.7. Полевые ГМР магнитотранзисторы

Полевые гальваномагниторекомбинационные магнитотранзисторы (ПГМР) представляют собой усовершенствованный вариант гальваномагниторекомбинационного преобразователя (ГМР) (см. главу 2.6).

Структуры ПГМР в упрощенном виде приведены на рис. 2.102 и 2.103.

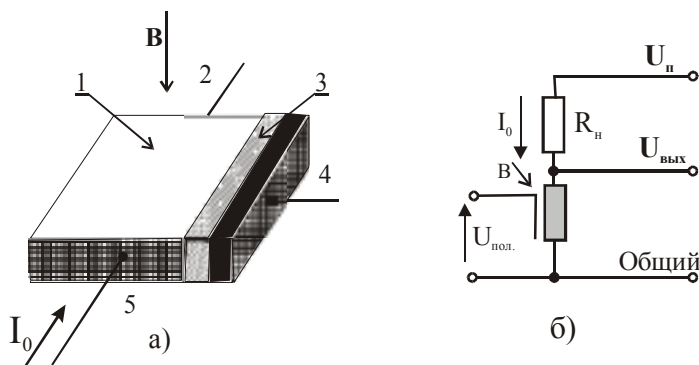


Рис. 2.102. Полевой гальваномагниторекомбинационный магнитотранзистор МДП: а – структура; б – схема включения

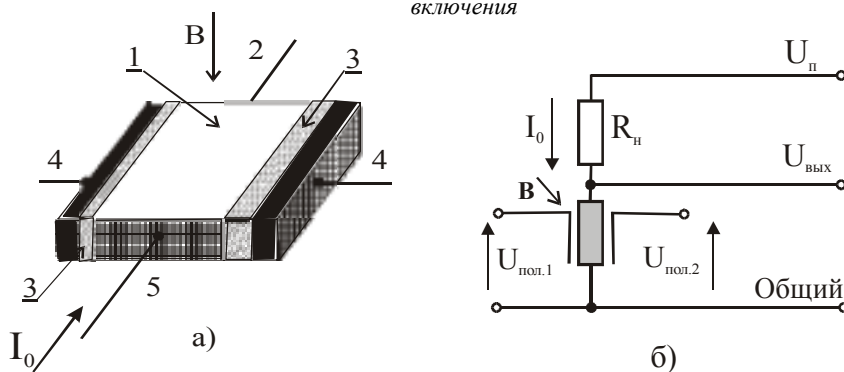


Рис. 2.103. Полевой гальваномагниторекомбинационный магнитотранзистор МДПДМ: а – структура; б – схема включения

Полевой гальваномагниторекомбинационный МДП магнитотранзистор состоит из полупроводниковой пластины 1, проводимость которой близка к собственной (рис. 2.102.а), и одного или двух металлических полевых 4 электродов, изолированных слоями диэлектрика 3. На торцах пластины расположены токовые электроды 2 и 5. Электроды 4 служат для подвода управляющего напряжения.

На рис. 2.103а показан МДПДМ магнитотранзистор, в котором управляющее напряжение подводится к обоим полевым электродам 4.

Действие полевых гальваномагниторекомбинационных магнитотранзисторов (ПГМР) основано на изменении средней концентрации носителей заряда в полупроводнике при воздействии на него магнитного поля, продольного и поперечного электрических полей. (Подробнее см. в [24].).

В табл. 2.15 приведены параметры германиевых ПГМР, изготовленных в Институте физики полупроводников АН Литовской ССР [15, 57, 59].

Таблица. 2.15. Параметры опытных образцов германиевых ПГМР

Тип преобразователя	Структура	Выходное сопротивление, $R_{\text{вых}}$, кОм	Номинальный рабочий ток, мА	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/Тл*А	Температурный коэффициент чувствительности, %/градус	Коэффициент нелинейности, %	Рабочий диапазон по индукции, Тл
МТ-1	МДП	120	0,8	70	$8,7 \cdot 10^4$	0,2	0,5	$1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-1}$
МТ-2	МДП	60	1,1	70	$7,0 \cdot 10^4$	0,2	0,5	$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-1}$
МТ-3	МДПДМ	120	0,8	100	$1,25 \cdot 10^5$	0,2	0,5	$1 \cdot 10^{-6} \dots 1 \cdot 10^{-1}$
МТ-4	МДПДМ	60	1,1	100	$1,0 \cdot 10^5$	0,2	0,5	$1 \cdot 10^{-7} \dots 1 \cdot 10^{-1}$

На рис. 2.104 показаны зависимости выходного напряжения ПГМР от тока управления и магнитной индукции. Эти магнитотранзисторы обладают достаточно линейной энергетической характеристикой в диапазоне индукций до ± 100 мТл. Диапазон рабочих температур магнитотранзисторов МТ-1 – МТ-3 от -50 до $+50$ °С.

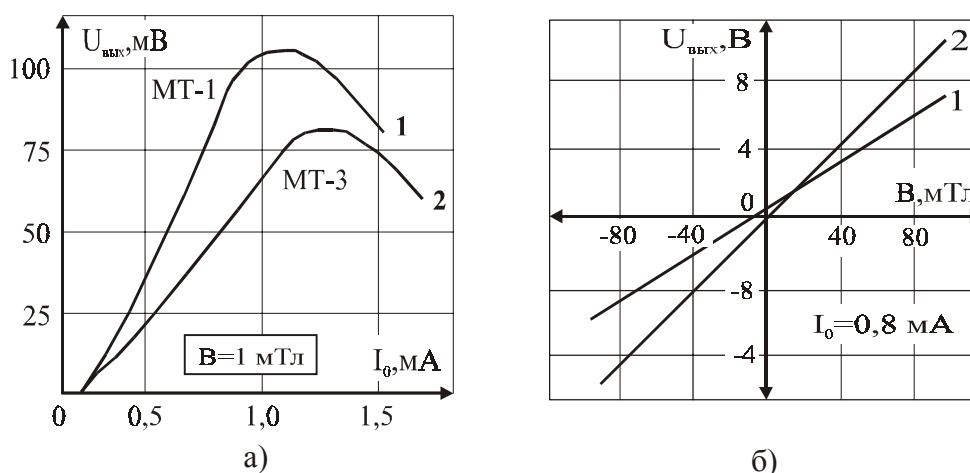


Рис. 2.104. Типовые зависимости выходного напряжения ПГМР магнитотранзисторов со структурой: 1 – МДП; 2 – МДПДМ; а – от тока управления; б – от магнитной индукции

В СССР ПГМР преобразователи производились ограниченными партиями. Они использовались в опытной аппаратуре. Сведений о серийном производстве ПГМР в России не имеется.

Недостатком ПГМР магнитотранзисторов считается необходимость использования высоковольтных источников питания (порядка 100 В).

При организации серийного производства, использование ПГМР магнитотранзисторов может быть эффективно при построении измерителей магнитных величин с автоматической коррекцией погрешностей или аналого-цифровым преобразованием входной магнитной величины, различных магнитных и электрических регуляторов устройств автоматики и управления с переменной или адаптируемой структурой.

2.8. Преобразователь магнитного поля на доменоносителях

В противоположность магнитотранзисторам, в которых инжекция тока происходит в области эмиттерного перехода, в преобразователях на доменоносителях инжекция тока в большей или меньшей степени концентрируется на одном месте на переходе. Структура ПМП на доменоносителях очень схожа со структурой вертикального магнитотранзистора, за исключением того, что в данном случае подложка играет активную роль.

На рис. 2.105 приведена структура преобразователя магнитного поля на доменоносителях [37].

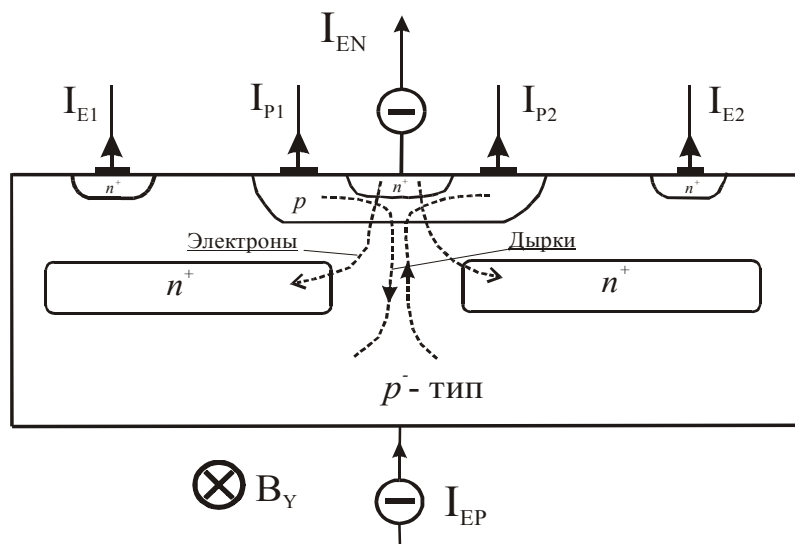


Рис. 2.105. Структура преобразователя магнитного поля на доменоносителях (В рисунке сохранены обозначения оригинала [37])

Подложка структуры (рис. 2.105) фактически является эмиттером p-n-p транзистора. В верхней точке указанной структуры можно видеть n-p-n транзистор.

Структура функционирует следующим образом. Ток, инжектируемый n^+ эмиттером n-p-n структуры, собирается в базе p-n-p структуры, и, наоборот, ток, инжектируемый p-эмиттером p-n-p структуры собирается в базе n-p-n структуры. Токи вызывают падение напряжения в соответствующих базах, таким образом, что инжекция будет ограничиваться центром перехода, и, образуется электрический домен. Если приложить магнитное поле, то домен сместится, и токи базы I_{P1} и I_{P2} не будут более равными (так же как не будут более равными и токи базы I_{N1} и I_{N2}). То есть возникает разность токов, которая и является сигналом ПМП на доменоносителях.

Если напряжения на обеих гранях базы равны (режим работы на «токовой моде»), то выражение реакции устройства на магнитное поле можно записать следующей формулой:

$$S_{dm} = \Delta I_t = B(\mu_{H_n} \times W_n + \mu_{H_p} \times W_p) \times I_t \times \gamma_d \quad (2.23)$$

где I_t - сумма токов базы;

ΔI_t - сумма разностей токов, проходящих по соответствующим контактам базы;

μ_{Hn} - холловская подвижность электронов;

μ_{Hp} - холловская подвижность дырок;

W_n и W_p - расстояние, которое проходят носители заряда;

γ_d - коэффициент, зависящий от величины домена и равный 10–100.

Магнитная чувствительность (S_{dm}) ПМП на доменоносителях, определяемая, как

$$S_{dm} = \Delta I_t \times 100\% / \Delta I_t \times B \quad (2.24)$$

для структуры, приведенной на рис. 2.105, составляет порядка 30%/Тл.

На рис. 2.106 показан вариант структуры, «вращающегося» ПМП на доменоносителях [37].

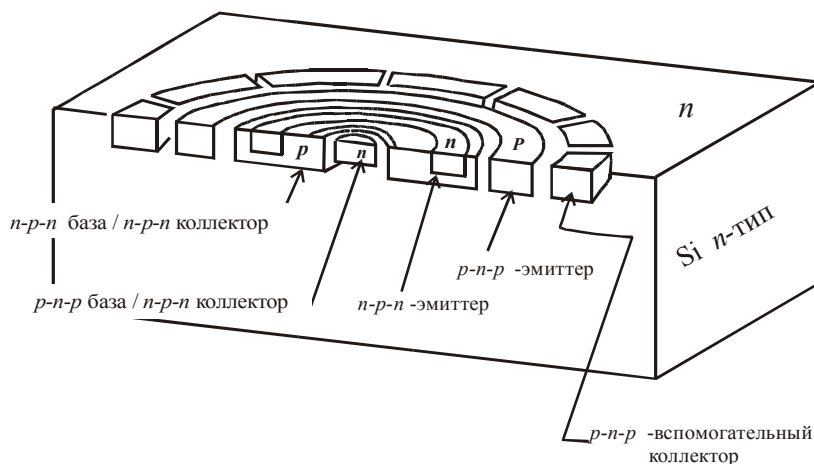


Рис. 2.106. Структура «вращающегося» ПМП на доменоносителях

Выходной сигнал структуры, приведенной на рис. 2.106, является не разностью токов, а потоком токовых импульсов с частотой, пропорциональной магнитному полю. Образование домена происходит так же, как и в структуре на рис. 2.105.

Если магнитное поле приложено перпендикулярно поверхности кристалла, то домен начинает вращаться, и вращение происходит непрерывно.

Токовые импульсы поглощаются дополнительными коллекторами каждый раз, когда домен проходит около них. При этом частота реакции устройства на магнитное поле выражается формулой:

$$f_r = (d \times \mu_p \times B_z) / (2\pi \times t_p \times R) \quad (2.24)$$

где f_r - частота вращения домена;

d - радиальное пространство между n-p-n областью эмиттера и p-n-p областью базы;

μ_p - подвижность дырок;

t_p - время подзарядки слоя базы p-n-p транзистора;

R - радиус внешней грани n-p-n эмиттера.

Магнитная чувствительность такого устройства выражается, значением $\Delta f / B$ и составляет величину от 100 до 200 кГц/Тл [37].

Работу такого устройства затрудняет наличие порогового уровня плотности магнитного потока, ниже которого, вращения домена не происходит. Наличие такого порогового барьера относят за счет пространственного изменения коэффициента передачи по току в схеме с общей базой горизонтального p-n-p транзистора.

Чувствительность магнитотранзисторов и некоторых устройств на доменоносителях выражается, значением

$$S = (\Delta f_{pm} \times 100\%) / (\Delta I_{pm} \times B)$$

Чувствительность других устройств на доменоносителях определяется как изменение $\Delta f / B$, тогда как, чувствительность магнитодиодов выражается как изменение напряжения (тока) смещения при воздействии магнитного поля.

Преобразователи магнитного поля на доменоносителях пока являются «экзотическими» приборами и не нашли широкого применения в конкретной аппаратуре.

Подробнее о работе ПМП на доменоносителях можно прочесть в специальной литературе [12, 37, 98].

2.9. Магниточувствительные Z-элементы

Магниточувствительные Z-элементы с частотно-импульсным выходом представляет собой полупроводниковую p-n структуру. Структура чувствительна к постоянному и переменному магнитному полю, направленному перпендикулярно направлению управляющего тока (рис. 2.107.а).

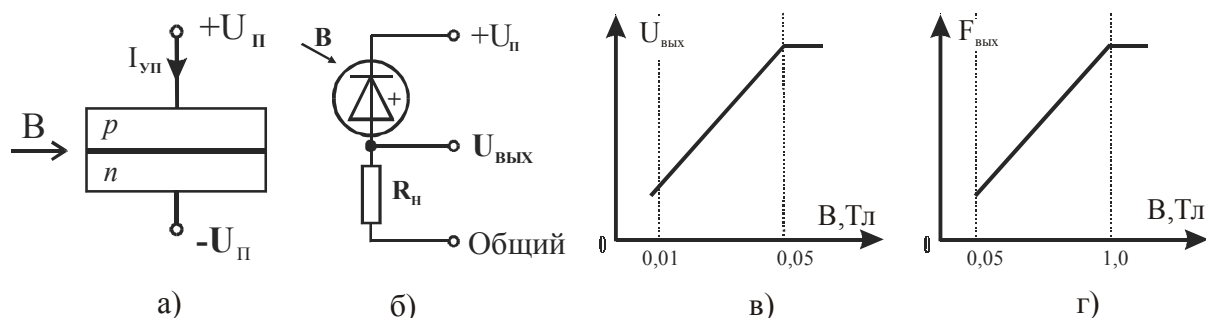


Рис. 2.107. Магниточувствительный Z-элемент: а – структура; б – схема включения; в, г – выходные характеристики

Магниточувствительный Z-элемент работает в двух режимах:

- при индукции управляющего магнитного поля $B < 30\text{--}50$ мТл элемент работает в аналоговом режиме, то есть выходное напряжение пропорционально индукции (рис. 2.107.в);
- при индукции управляющего магнитного поля $B > 30\text{--}50$ мТл элемент генерирует последовательность импульсов, частота следования которых пропорциональна индукции (рис. 2.107.г). Амплитуда выходных импульсов достигает 30–40%, то есть нескольких вольт.

Основные параметры магниточувствительных Z-элементов:

Напряжение питания	5–30 В;
Ток управления	1–3 мА;
Магнитная чувствительность в аналоговом режиме.....	500–600 В/Тл;
Магнитная чувствительность в частотном режиме.....	50–100 кГц/Тл;
Динамический диапазон.....	0,01–1,0 Тл;
Габариты полупроводниковой структуры.....	5×2×0,3 мм.

Магниточувствительные Z-элементы пока не производятся серийно, а потому широкого распространения не получили. (Подробнее см. [31].)

2.10. Датчики Виганда

Принцип действия датчика основан на т.н. эффекте Виганда.

Этот эффект проявляется в том, что если ферромагнитную проволоку, имеющую специальный химический состав и физическую структуру, внести в магнитное поле, то произойдет спонтанное изменение её магнитной поляризации, как только напряженность поля превысит определенное пороговое значение. Этот порог называется – порогом зажигания. Изменение состояния проволоки можно регистрировать при помощи обмотки, намотанной вокруг проволоки или размещенной рядом с ней.

Датчик Виганда представляет собой двухполюсник, реагирующий на магнитные поля и вырабатывающий сигналы в диапазоне нескольких вольт при условии, что напряженность управляющего магнитного поля превышает величину напряженности поля зажигания.

Датчики Виганда не требуют какого-либо источника питания, их выходной сигнал практически не зависит от частоты изменения поля, и их можно использовать в широком диапазоне рабочих температур (от -196 до $+175^{\circ}$).

Конструкция простейшего датчика Виганда приведена на рис. 2.108. Датчик состоит из проволоки изготовленной из ферромагнитного сплава типа викаллой (10% ванадия, 52 % кобальта и железа) и обмотки. Точный состав материала проволоки, как правило, является секретом фирмы.

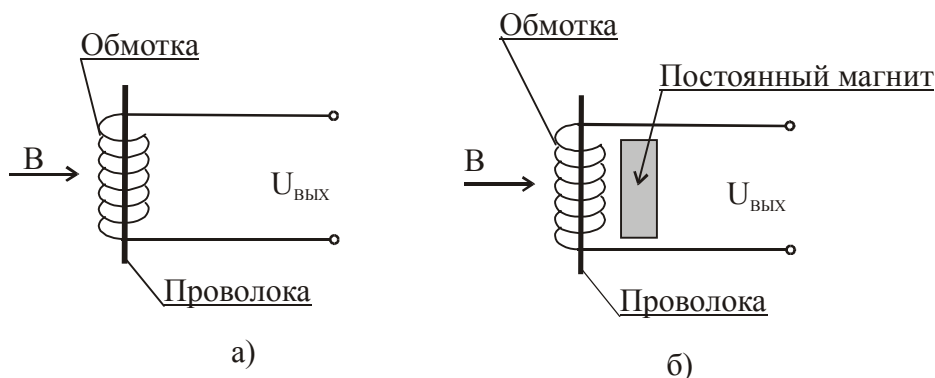


Рис. 2.108. Конструкция датчика Виганда: а – с обмоткой, б – с обмоткой и постоянным магнитом



Рис. 2.109. Структура проволоки Виганда

Проволока Виганда (рис. 2.109) представляет собой ферромагнитное тело, состоящее из магнитомягкой сердцевины и магнитотвердой внешней оболочки, окружающей сердцевину. Получение такой структуры достигается за счет использования специальной технологии изготовления. Диаметр проволоки составляет порядка 0,2...0,3 мм. Длина от 5 до 40 мм.

Обмотка датчика, обычно, составляет порядка 1000...2000 витков медного провода диаметром 0,05...0,1 мм.

Модульное исполнение датчика, состоящего из проволоки, обмотки и постоянного магнита, позволяет разрабатывать большое число вариантов датчиков перемещения. Область их применения простирается от задач измерения и контроля до систем управления доступом, в которых они служат носителями информации в идентификационных картах.

Ниже приводятся некоторые примеры, которые дают представления о широкой области применения датчика. Рис. 2.110.а поясняет принципиальную схему восприятия вращательного движения. Проволока с обмоткой вокруг неё фиксируется, тогда как магнит насыщения и магнит гашения располагаются на вращающемся барабане, изготовленном из алюминия.

Для датчика длиной 40 мм, установленном в промежутке между проволокой и вращающимся барабаном от 1 до 2 мм, используются два стержневых магнита с индукцией 80 и 30 мТл, соответственно, для генерации сигнала с амплитудой около 2 вольт при достаточной временной стабильности. На рис. 2.110.б приведен вид выходного сигнала датчика.

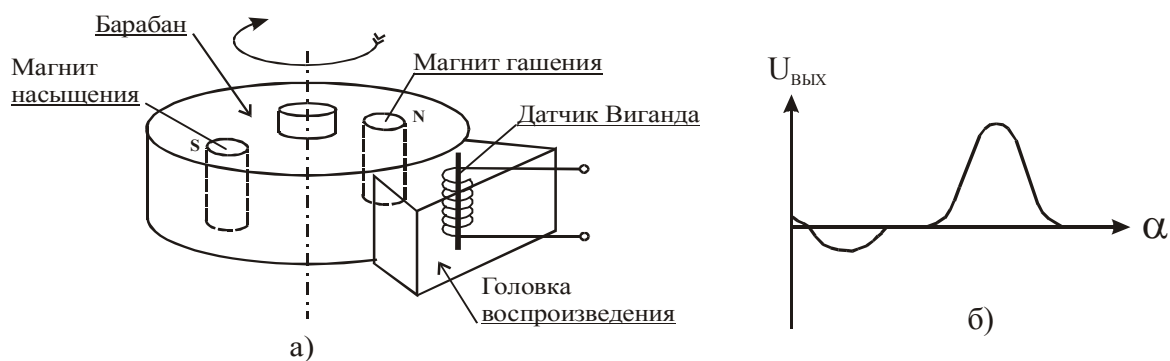


Рис. 2.110. Использование датчика Виганда с одной обмоткой: а — в качестве датчика угла вращения; б — вид выходного сигнала

Для того чтобы исключить установку двух подвижных магнитов, магнит гашения (30 мТл) можно расположить очень близко к датчику (рис. 2.111.а). При фиксированном магните гашения, в качестве подвижного магнита насыщения должен использоваться более «сильный» магнит, чтобы компенсировать поле магнита гашения. В этом заключается достоинство датчика, который всегда «видит» поле любого магнита, и, следовательно, менее восприимчив к внешним полям.

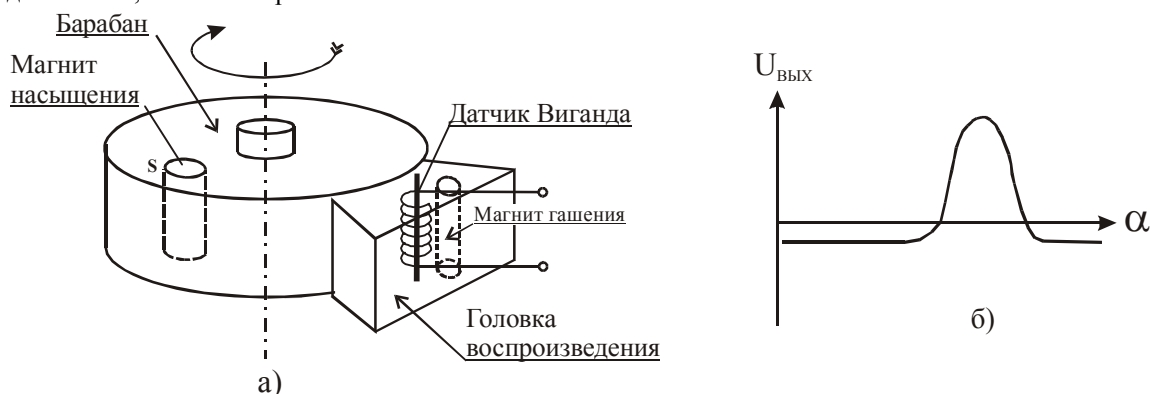


Рис. 2.111. Использование датчика Виганда с одной обмоткой и постоянным магнитом: а — в качестве датчика угла вращения; б — вид выходного сигнала

Если требуется получить более одного импульса за один оборот, можно воспользоваться другой конструкцией. Проволоки Виганда равномерно распределяют вокруг барабана из цветного металла и ориентируют параллельно его оси. Проволоки получают подвижными и отделенными от обмотки датчика, которая вместе с двумя магнитами располагается в головке воспроизведения. По сравнению с датчиком с вращающимися магнитами в этом случае изменяются параметры проволоки и магнита. Вследствие меньшего диаметра проволоки угловое разрешение этого датчика угла вращения может быть значительно увеличено. Стержневые магниты и обмотка датчика между ними ориентированы параллельно проволокам. Магниты имеют противоположную полярность, и их индукция соответственно равняется ± 60 мТл [71].

При некотором изменении конструкции датчика, он может быть использован в качестве двухнаправленного прибора. Необходимо только повернуть плоскость движения почти на 90° вокруг датчика в противоположную к нему плоскость. Затем датчик необходимо переместить на центральную линию, симметричную относительно плоскости полюсов. Напряженность статического поля будет равна нулю. Если стержень приблизится с одной стороны датчика, то он будет насыщаться полем соответствующего знака, генерируя импульс такой же полярности. Если стержень приблизится с другой стороны датчика, то поле и полярность амплитуды изменятся, индицируя направление движения. При этом выходной сигнал примет вид, показанный на рис. 2.112, (подробнее см. [71, 72]).

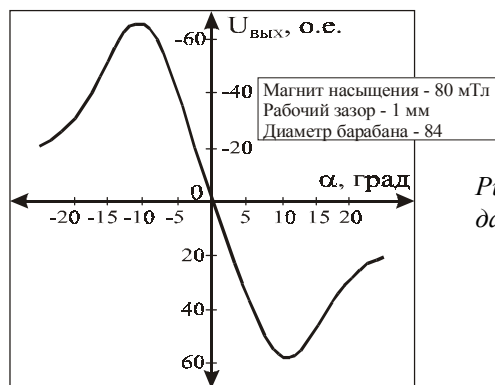


Рис. 2.112. Вид выходного сигнала двухнаправленного датчика Виганда

Датчики вращательного движения можно легко модифицировать в датчики линейного движения. Рассматривая описанные варианты датчиков вращательного движения в интересующем нас аспекте получения датчика линейного движения, проще всего вставить проволоки между полосками пластиковой или алюминиевой фольги. Эти полоски крепятся к поверхностям с помощью клея, зажимных приспособлений или прессованием, соблюдая линии изгиба соответствующего радиуса. Подобные датчики используют совместно с одно- и двухнаправленными головками воспроизведения с разрешением 2 мм. Производство таких датчиков экономично.

Вследствие остаточной намагниченности проволока Виганда остается в намагниченном состоянии до тех пор, пока поле возбуждения, достаточно сильное для того, чтобы преодолеть коэрцитивную силу проволоки, не переключит ее в противоположное состояние.

Это свойство может быть использовано для хранения информации так, как это происходит в хорошо известной памяти на магнитных сердечниках.

Способность датчика к хранению информации остается стабильной до тех пор, пока она не будет уменьшена в результате воздействия сильных внешних полей. Так как хранение информации не требует какой-либо электрической энергии, ключи на основе эффекта Виганда очень удобны для ввода данных с циклическим опросом. Вследствие запоминания данных, скорость опроса может быть значительно снижена. В случае отключения питания подключенной схемы опроса ни одно действие ключа не будет потеряно.

Способность проволоки Виганда хранить данные очень успешно используется в считываемых идентификационных картах. Они состоят из двух рядов коротких кусков проволоки, представляющих «0» и «1» (максимальная ёмкость 56 бит), которые вставлены в пластиковые карты точно установленного размера. Перед тем, как карта поступит на устройство считывания, все проволоки должны быть насыщены в одном и том же направлении магнитного насыщения. Следовательно, информация станет полностью независимой от воздействия внешних полей, которые могут изменять магнитное состояние проволок перед считыванием. Информация основана только на геометрической конфигурации проволок и поэтому не изменяется [71, 72, 73, 74].

В главе 16 тома 2 приводятся основные параметры некоторых типов датчиков Виганда.

2.11. Феррозондовые ПМП

Феррозондовый преобразователь магнитного поля, или феррозонд, предназначен для измерения и индикации постоянных и медленно меняющихся магнитных полей и их градиентов.

Действие феррозонда основано на изменении магнитного состояния ферромагнетика под воздействием двух магнитных полей разных частот. На рис. 2.113 схематически показаны некоторые варианты конструкций феррозондов.

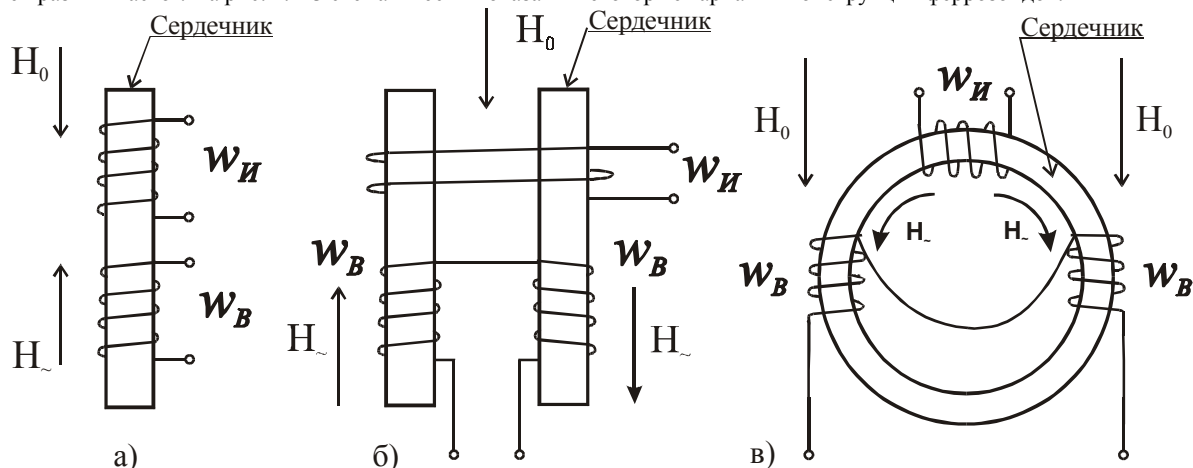


Рис. 2.113. Варианты конструкций феррозондов: а – одноэлементный стержневой; б – дифференциальный с разомкнутым сердечником; в – дифференциальный с замкнутым сердечником

В простейшем варианте феррозонд состоит из ферромагнитного сердечника и находящихся на нем двух катушек: катушки возбуждения (W_B), питаемой переменным током, и измерительной (сигнальной) катушки (W_H).

Сердечник феррозонда выполняется из материалов с высокой магнитной проницаемостью.

На катушку возбуждения от специального генератора подается переменное напряжение с частотой от 1 кГц до 300 кГц. (в зависимости от уровня параметров и назначения прибора).

В отсутствие измеряемого магнитного поля сердечник под действием переменного магнитного поля (H_{\sim}), создаваемого током в катушке возбуждения, перемагничивается по симметричному циклу. Изменение магнитного поля, вызванное перемагничиванием сердечника по симметричной кривой, индуцирует в сигнальной катушке ЭДС, изменяющуюся по гармоническому закону. Если одновременно на сердечник действует измеряемое постоянное или медленно меняющееся магнитное поле (H_0), то кривая перемагничивания меняет свои размеры и форму и становится несимметричной. При этом изменяется величина и гармонический состав ЭДС в сигнальной катушке. В частности, появляются четные гармонические составляющие ЭДС, величина которых пропорциональна напряженности измеряемого поля и которые отсутствуют при симметричном цикле перемагничивания.

Феррозонды подразделяются на: стержневые одноэлементные (рис. 2.113.а), дифференциальные с разомкнутым сердечником (рис. 2.113.б) и дифференциальные с замкнутым (кольцевым) сердечником (рис. 2.113.в).

Дифференциальный феррозонд (рис. 2.113.б,в), как правило, состоит из двух сердечников с обмотками, которые соединены так, что нечетные гармонические составляющие практически компенсируются. Тем самым упрощается измерительная аппаратура и повышается чувствительность феррозонда.

Феррозонды отличаются очень высокой чувствительностью к магнитному полю. Они способны регистрировать магнитные поля с напряженностью до 10^{-4} – 10^{-5} А/м ($\sim 10^{-10}$ – 10^{-11} Тл). Подробнее см. [3, 64].

Современные конструкции феррозондов отличаются компактностью. Объем феррозонда, которым комплектуются отечественные магнитометры Г73, составляет менее 1 см³, а для магнитометра Г74 трехкомпонентный феррозонд вписывается в куб со стороной 15 мм [64].

В качестве примера на рис. 2.114 приведена конструкция и габариты миниатюрного стержневого феррозонда.

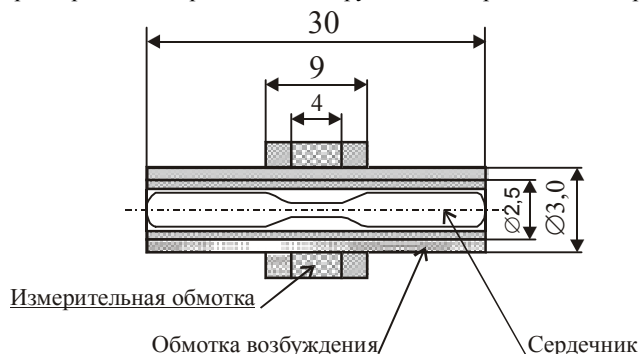


Рис. 2.114. Конструкция и габариты миниатюрного стержневого феррозонда

Конструкция феррозонда достаточно проста и не требует особых пояснений.

Сердечник феррозонда изготовлен из пермаллоя. Он имеет переменное по длине поперечное сечение, уменьшающееся примерно в 10 раз в центральной части сердечника, на которую нанесена измерительная обмотка. Такая конструкция обеспечивает при сравнительно небольшой длине (30 мм) высокую магнитную проницаемость ($1,5 \times 10^5$) и малое значение напряженности поля насыщения в центральной части сердечника, что приводит к увеличению фазовой и временной чувствительности феррозонда. За счет этого улучшается и форма выходных импульсов в измерительной обмотке феррозонда, что позволяет снизить погрешности схемы формирования время-импульсного сигнала.

Диапазон измерения феррозондовых преобразователей типовой конструкции составляет от ± 50 А/м до ± 100 А/м (от $\pm 0,06$ до $\pm 0,126$ мТл). Плотность магнитного шума в полосе частот до 0,1 Гц для феррозондов со стержневыми сердечниками составляет от 30 до 40 мкА/м ($\text{м} \times \text{Гц}^{1/2}$) в зависимости от поля возбуждения, уменьшаясь с увеличением последнего. В полосе частот до 0,5 Гц плотность шума оказывается в 3–3,5 раза выше. При экспериментальном исследовании кольцевых феррозондов установлено, что уровень шума у них на порядок ниже, чем у феррозондов со стержневыми сердечниками [64].

Промышленные образцы феррорезонансных магнитных датчиков

В качестве примера рассмотрим технические характеристики феррорезонансных магнитных датчиков APS533 и APS544, выпускаемых фирмой Applied Physics Systems (США). Основные параметры датчиков приведены в табл. 2.16, а на рис. 2.115 и 2.116 показан их внешний вид.

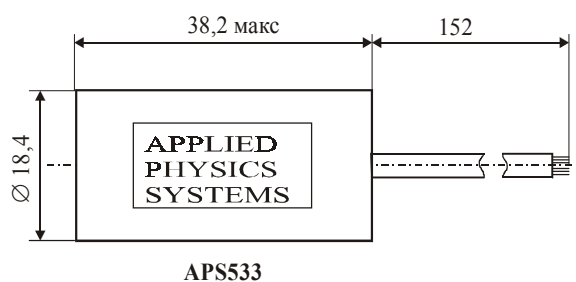


Рис. 2.115. Внешний вид и габариты датчика APS533

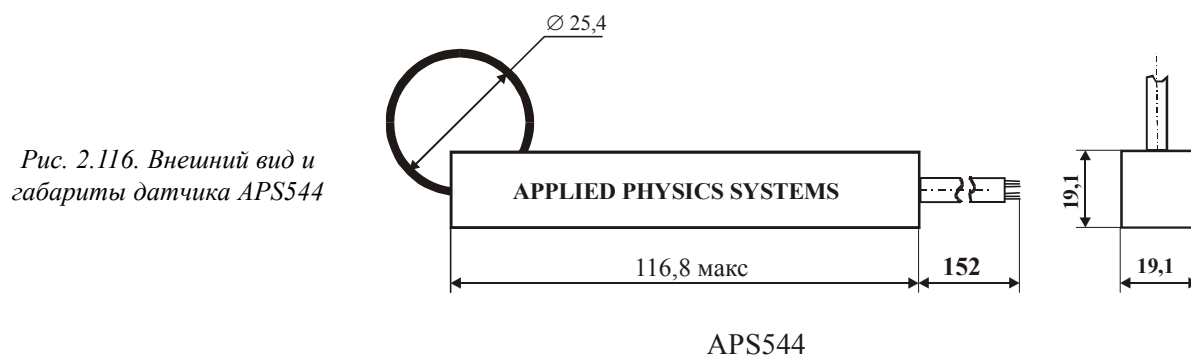


Рис. 2.116. Внешний вид и габариты датчика APS544

Таблица 2.16. Основные параметры феррорезонансных датчиков APS533 и APS544, выпускаемых фирмой Applied Physics Systems

Наименование параметра, единица измерения	Тип прибора	
	APS533	APS544
Тип преобразователя магнитного поля	феррозонд	феррозонд
Число одновременно измеряемых составляющих магнитного поля.	3	3
Порог чувствительности при отношении сигнал/шум, равном 1, нТл/Гц ^{-1/2}	0,1	0,4
Максимальная амплитуда измеряемого магнитного поля, мТл	± 0,1	± 0,1
Выход результата измерений	аналоговый	цифровой
Напряжение постоянного тока на аналоговом выходе, В	0 ± 4	стандарт RS232
Напряжение питания, В	± 5	от ± 5 до ± 7...12
Ток потребления, мА	± 20	75(+5В); 65(-5В)
Длина кабеля выносного датчика, мм	152	152
Габаритные размеры, мм	Ø18,4 x 38,1	19,1 x 19,1 x 116,8 (петля Ø 25,4)
Масса, г	18	50
Диапазон рабочих температур, °C	0...+70	0...+70

Феррозонды широко применяются в аппаратуре, предназначенной для измерения параметров магнитного поля Земли и его вариаций (например при поисках полезных ископаемых, создающих локальные аномалии магнитного поля); для измерения магнитного поля Луны, планет, межпланетного пространства; для обнаружения ферромагнитных предметов и частиц в неферромагнитной среде (в частности, в хирургии); в системах контроля за качеством выпускаемой продукции (в магнитной дефектоскопии и др.)

В феррозондах обнаружены существенные недостатки, ограничивающие их применение. Это невысокая геометрическая разрешающая способность, значительная зависимость основных параметров от воздействия климатических и механических факторов. Процесс изготовления феррозондов трудоемкий, и, следовательно, стоимость их довольно высокая. Значительной сложностью отличается и аппаратура, в которой используются феррозонды [3, 64].

2.11.1. Магнитоиндуктивные датчики

Фирмой Precision Navigation Inc. (США) разработан усовершенствованный вариант феррорезонансного датчика, который получил наименование магнитоиндуктивного датчика (Magneto-Inductive (MI) sensors).

Датчик представляет собой микроминиатюрную катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником. Катушка содержит всего одну обмотку и регистрирует магнитное поле в направлении только одной из осей.

Фирмой Precision Navigation Inc выпускаются три модификации MI - датчиков. Основные параметры этих датчиков приведены в табл. 2.17.

На рис. 2.117 приведена упрощенная схема включения MI - датчика. Схема представляет собой релаксационный LR-генератор, в котором MI - датчик выполняет роль основного элемента. Изменение напряженности воздействующего магнитного поля приводит к изменению частоты генератора.

Датчики предназначены для использования в составе электронных компасов. В этом случае выходной сигнал генератора обрабатывается ИС микропроцессора [96].

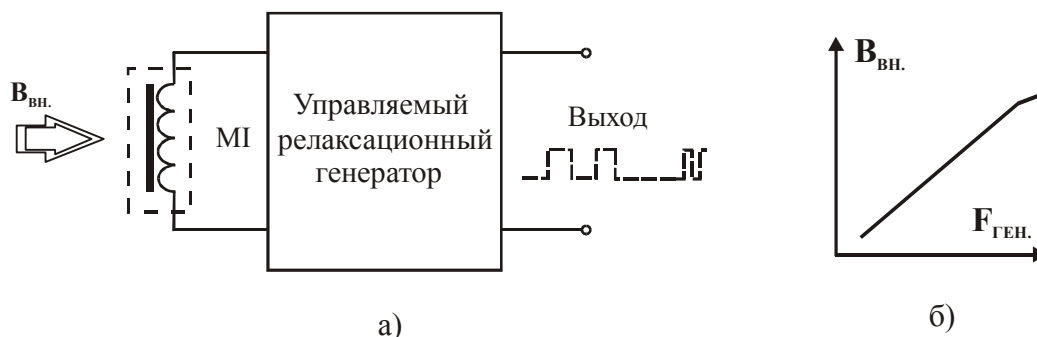


Рис. 2.117. Упрощенная схема включения: а – выходная характеристика; б – магнитоиндуктивного датчика

Таблица 2.17. Основные параметры магнитоиндуктивных датчиков, выпускаемых фирмой Precision Navigation Inc.

Наименование параметра, единица измерения	Тип датчика / значение параметра		
	SEN-T	SEN-W	SEN-M
Динамический диапазон, мТл	± 80	± 200	± 1,0
Точность измерения, мТл	± 0,2	± 0,4	± 0,4
Разрешающая способность, мТл	0,01	0,02	0,02
Повторяемость, мТл	± 0,2	± 0,4	± 0,4
Ток потребления, мА	<1,0	<1,0	<1,0
Габаритные размеры, мм ³	10,7 x 6,9 x 20	10,7 x 6,9 x 20	7,1 x 0,9 x 0,9
Масса, г	0,62	0,62	0,31
Диапазон рабочих температур, °C	-20...+70	-20...+70	-20...+70

2.12. Сравнительные характеристики и сферы применения ПМП

При разработке магнитоэлектронной аппаратуры и приборов основной задачей является оптимальный выбор преобразователя магнитного поля. Для начальной ориентировки в решении таких задач можно воспользоваться табл. 2.18 и рис. 2.118.

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/(Тл*А)	Динамический диапазон, мТл	Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 ⁰ С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Кoeffициeнт нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
1	Дискретный элемент Холла	От 0,02 до 50,0 (1...4*10 ³)	от 0,02 до 5,0	от 0,1 до 350 Порог чувствительности менее 0,001 мТл	1000	По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл	от 0 до 1*10 ⁷	Напряжение, В	Ток, мА	от 0,1 до 1,0	-(0,01...1)	от 0,03 до 5,0	от -269 до +185	Является преобразователем типа "магнитный поток - ЭДС." Высокая магнитная чувствительность и разрешающая способность. Большой динамический диапазон при хорошей линейности выходной характеристики. Широкий диапазон рабочих температур. Значительная величина остаточного напряжения и его нестабильность

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/(Тл*А)	Динамический диапазон, мТл	Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Кэффициент нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
2	Полевой элемент Холла	От 2,5*10 ⁻⁵ до 1,0 (10 ⁴ ... 1,2*10 ⁵)	от 0,01 до 1,1	от 50 до 1*10 ⁴ Порог чувствительности менее 0,001 мТл	100 ... 20 0	По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл	от 0 до 1*10 ⁶	от 5 до 9	от 0,05 до 0,5	20	от 0,13 до 0,36	от 0,1 до 2,0	от -269 до +250	Является преобразователем типа "магнитный поток - Э.Д.С." Высокая удельная магнитная чувствительность и разрешающая способность. Большой динамический диапазон при хорошей линейности выходной характеристики. Малый ток управления. Широкий диапазон рабочих температур. Значительная величина остаточного напряжения и его нестабильность.

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/(Тл*А)	Динамический диапазон, мТл	Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Коэффициент нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
						По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл		Напряжение, В	Ток, мА					
5	Магнитодiod cр-n- переходом	От 0,05 до 2,0 (1...6)*10 ³	От 10 до 90	От 3*10 ³ до 3*10 ⁴	от 20 до 90			(3...10) x 10 ³		от 1,0 до 5,0	200	от 0,3 до 0,6	от 0,1 до 0,3	от -60 до +100	Является преобразователем типа "магнитный поток - сопротивление". Высокая магнитная чувствительность. Ограниченный динамический диапазон и удовлетворительная линейность. Значительный ток потребления.

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/(Тл*А)	Динамический диапазон, мТл		Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Кoeffициент нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
					По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл	Диапазон рабочих частот, Гц		Напряжение, В		Ток, мА					
6	Многоколлекторный магнитотранзистор	От 5*10-5 до 0,1	до 100	от 1*10 ³ до 1*10 ⁵ Порог чувствительности менее 1 мТл	До 100	от 3 до 7	(3...10) x 10 ³		от 1,0 до 3,0		Н/Д	Н/Д	Н/Д	от 0,3 до 0,5	от -60 до +125	Является преобразователем типа "магнитный поток - ток." Высокая магнитная чувствительность. Ограниченный динамический диапазон и удовлетворительная линейность в сильных магнитных полях.Значительное напряжение разбаланса и его нестабильность.

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В / (Тл * А)	Динамический диапазон, мТл	Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Коэффициент нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
						По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл		Напряжение, В	Ток, мА					
7	ГМР-преобразователь	От 0,5 до 2,0 (5*10 ³ ... 5*10 ⁴)	от 6 до 60	От 7,5*10 ³ до 6*10 ⁴	от 0 до 80			Н/Д		От 0,8 до 1,0	Н/Д	От 0,2 до 2,0	Н/Д	от -60 до +60	Является преобразователем типа "магнитный поток - сопротивление." Высокая удельная магнитная чувствительность. Малый ток потребления. Ограниченный динамический диапазон и удовлетворительная линейность. Ограниченный диапазон рабочих температур.

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/(Тл * А)	Динамический диапазон, мТл	Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Коэффициент нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
						По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл		Напряжение, В	Ток, мА					
8	Полевые ГМР с магнитотранзисторами	Н/Д	от 70 до 100	От 8,7 *10 ⁴ до 1,25 * 10 ⁵	От 0,001 до 100			Н/Д	более 100	От 0,8 до 11,0	Н/Д	0,2	0,5	от -60 до +60	Является преобразователем типа "магнитный поток - сопротивление." Высокая удельная магнитная чувствительность. Малый ток потребления. Ограниченный динамический диапазон и удовлетворительная линейность. Ограниченный диапазон рабочих температур.

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/(Тл*А)	Динамический диапазон, мТл	Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Кoeffициент нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
						По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл		Напряжение, В	Ток, мА					
9	Магниточувствительный Z-элемент	5 x 2	От 500 до 600	От 2 * 10 ⁵ до 5 * 10 ⁵ Порог чувствительности ~10 мТл	от 10 до 50				от 5 до 30	От 1,0 до 3,0		От 0,2 до 2,0		от -60 до +60	Является преобразователем типа "магнитный поток - сопротивление." или "магнитный поток - частота". Высокая магнитная чувствительность. Сравнительно малый ток потребления. Ограниченный динамический диапазон и удовлетворительная линейность. Ограниченный диапазон рабочих температур.

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/(Тл*А)	Динамический диапазон, мТл	Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Кэффициент нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
						По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл		Напряжение, В	Ток, А					
10	Магнитониндуктивный преобразователь	10 x 8 x 4 (0,01...0,1)	от 1 до 10	Порог чувствительности от 0,001 до 0,1 мТл	от 1 до 200			от 0 до 10 ⁶		До 1,0	До 1,0			от -20 до +70	Является преобразователем типа "магнитный поток - индуктивность" или "магнитный поток - частота". Очень высокая магнитная чувствительность. Малый ток потребления. Ограниченный динамический диапазон при удовлетворительной линейности. Ограниченный диапазон рабочих температур.

Таблица 2.18. Сравнительные характеристики наиболее известных типов преобразователей магнитного

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Размер активной области, мм ² , (Входное сопротивление, Ом)	Магнитная чувствительность, В/Тл	Удельная магнитная чувствительность, В/(Тл*А)	Динамический диапазон, мТл		Относительная магнитная чувствительность		Диапазон рабочих частот, Гц	Параметры источника питания		Максимальная рассеиваемая мощность при температуре 20 °С, мВт	Температурный коэффициент чувствительности (при В=0), %/°С	Кoeffициент нелинейности, %	Диапазон рабочих температур, С	Комментарии
							По току, %/Тл	По напряжению, %/Тл		Напряжение, В	Ток, мА					
11	Феррозондовый преобразователь	от 1,0 до 100	~10	Порог чувствительности от 0,00005 до 1 мТл	от 0,1 до 1,0	от 0,1 до 1,0			от 0 до 10 ⁴		До 100	До 100		от 1 до 5	от -40 до +85	Является преобразователем типа "магнитный поток - индуктивность". Очень высокая удельная магнитная чувствительность. Сравнительно малый ток потребления. Ограниченный динамический диапазон при удовлетворительной линейности. Ограниченный диапазон рабочих температур.

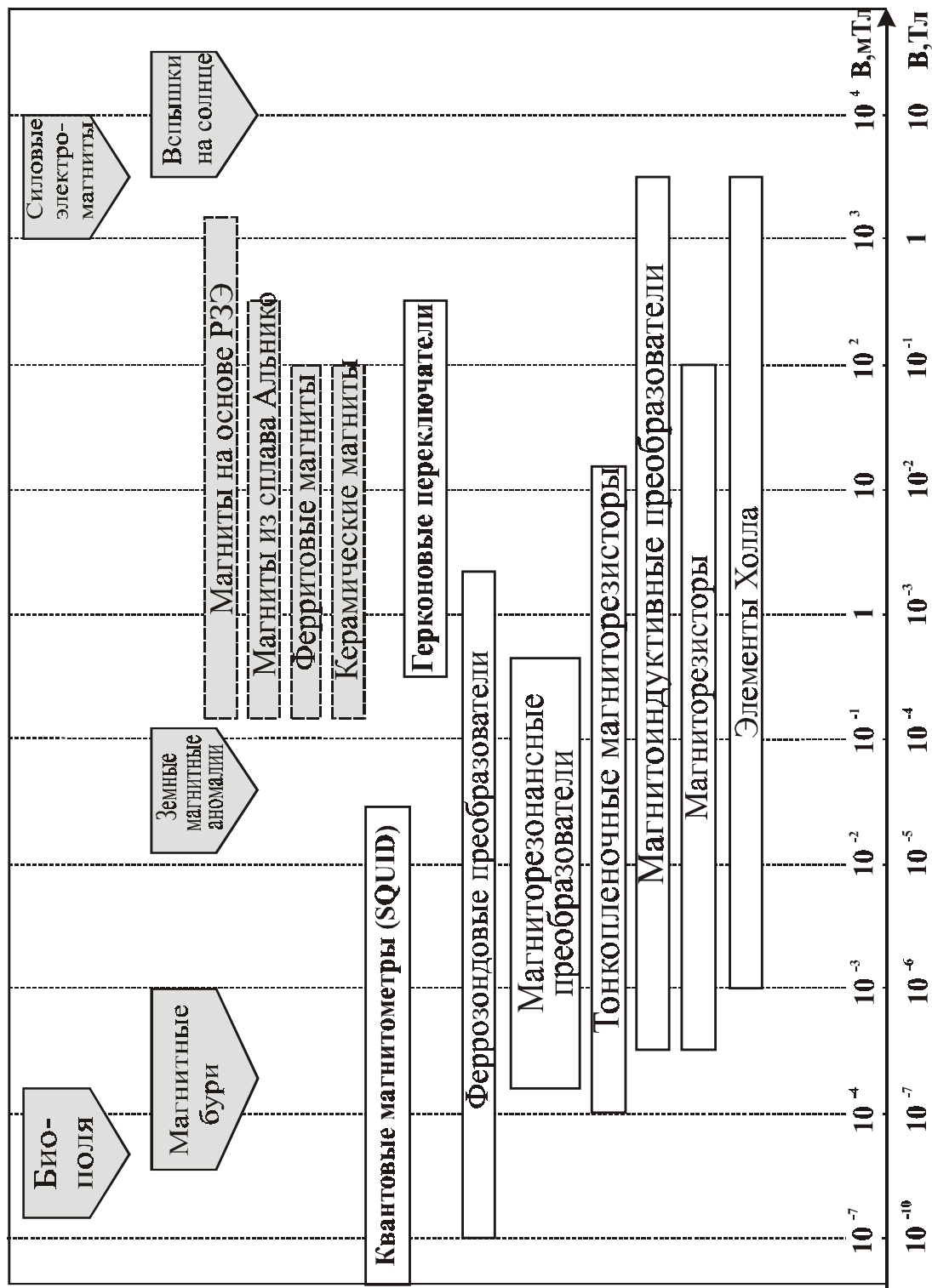


Рис. 2.118. Сферы возможного применения наиболее распространенных типов преобразователей магнитного поля

Список литературы к главе 2

1. Абрамзон Г. В., Гуровская И. Г., Полякова Р. Н., Шеленшкевич В. А. Магниточувствительный элемент. Рекламно-информационный листок № 151-92. ЛЦНТИ. 1992.
2. Аверин Н. Н., Васильева Н. П. и др. Разработка тонкопленочных двухслойных магниторезисторных датчиков. // Приборы и системы управления, № 2, 1995. – С. 24–26.
3. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецова Н. Н. Датчики контроля и регулирования. Справочные материалы. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.
4. Акимов А. Г., Барабаненков М. Ю., Бараночников М. Л., Леонов А. В., Мокрушин А. Д., Мордкович В. Н., Омеляновская Н. М. Управляемый резистор с функциями полевого транзистора и полевого датчика Холла. // Приборы и техника эксперимента. № 5, 1998. – С. 123–126.
5. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л., Смолин О. В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. – М.: Энергоиздат, 1984. – 208 с.
6. Амеличев В. В., Чаплыгин Ю. А. Интегральный сенсор магнитного поля комбинированного типа. // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА, № 2, 1998. – С. 41–44.
7. Афанасьев Ю. В. и др. Средства измерения параметров магнитного поля. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
8. Бараночников М. Л. Магниторезисторы // Радио, № 7, – с. 42; № 8, – с. 45–46; № 9, – с. 41–42, 1994.
9. Бараночников М. Л., Папу В. В. Микросхемы серии K1116 // Радио, № 6, – с. 84; № 7, – с. 71–72; № 8, – с. 89. 1990.
10. Ван дер Зил. А. Шум. Источники, описание, измерение. – М.: Сов. радио, 1973. – 228 с.
11. Васильева Н. П., Касаткин С. И., Аверин Н. Н. и др. Разработка тонкопленочных двухслойных магниторезистивных датчиков // Приборы и системы управления, № 2, 1995. – С. 24–26.
12. Васильева Н. П., Касаткин С. И., Муравьев А. М. Магниторезистивные датчики на тонких ферромагнитных пленках. Обзор // Приборы и системы управления, № 8, 1994. – С. 20–23.
13. Васильева Н. П., Касаткин С. И., Муравьев А. М. Магниторезистивные датчики на тонких ферромагнитных пленках. Обзор // Приборы и системы управления, № 12, 1994. – С. 26–28.
14. Виг Р., Девей Р. Датчики Холла приобрели широкую популярность. (Пер. с англ. статьи из журнала Sensors, Janiary, 1990, V 7, # 1. – Рр. 32–36).
15. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.
16. Викулин И. М., Глауберман М. А., Егиазарян Г. А. и др. Двухколлекторные магнитотранзисторы // Приборы и системы управления, № 10, 1981. – С. 3–5.
17. Викулин И. М., Глауберман М. А., Егиазарян Г. А. и др. Магнитогиристоры // Приборы и системы управления, № 7, 1981. – С. 1–8.
18. Воробьев Ю. В., Добровольский В. Н., Стриха В. И. Методы исследования полупроводников. – Киев: Выща школа, 1988. – С. 9–17.
19. Галушков А. И., Миргородский Ю. Н. Моделирование магниточувствительного элемента на основе двухстокового МОП транзистора // Микроэлектроника, № 1, 1995. – С. 3–1.
20. Галушков А. И., Чаплыгин Ю. А. Кремниевые магниточувствительные интегральные схемы // Известия вузов. ЭЛЕКТРОНИКА, № 1, 1997. – С. 5–6.
21. Гасанов Г. А., Карба Л. П., Поровский Г. С., Соколов Ю. И. Шумовые свойства и пороговая магниточувствительность кремниевых магнитодиодов // Известия вузов СССР. Приборостроение. Т.25, № 10, 1982. – С. 5–9.
22. Гасанов Г. А., Кружанов Ю. В. Частотные свойства магнитодиодных датчиков для магниточувствительных ИС // Микроэлектроника и полупроводниковые приборы. Сб. статей. – М.: Сов. радио, 1977. Вып. 2. – 229 с.
23. Егиазарян Г. А., Лещенко Г. И. Магнитодиодные считывающие модули для цифровых преобразователей угла // Электронная промышленность. 1983. Вып. 3. – С. 6–8.
24. Егиазарян Г. А., Стафеев В. И. Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.
25. Егиазарян Г. А., Бархударян М. С., Саркисян А. С. Датчик магнитного поля с полярной магниточувствительностью // Изв. АН АрмССР. Физика. 1983. Т. 18. – С. 311–314.
26. Егиазарян Г. А., Каракушан Э. И., Мурыгин В. И., Манвелян Ю. С. Исследование ВАХ и магниточувствительности полярных магнитодиодов // Изв. АН АрмССР. Физика. 1979. Т. 14. – С. 35–63.
27. Егиазарян Г. А., Манвелян Ю. С., Мнацакян Г. А., Саркисян А. С. Магнитодиод КД304 – простейшая функциональная схема // Электронная промышленность. 1980. Вып. 1. – С. 42–44.
28. Егиазарян Г. А., Мнацакян Г. А., Саркисян А. С. Некоторые свойства кремниевых магнитодиодов // Известия АН АрмССР. Физика. 1981. Т. 16. – С. 22–25.
29. Егиазарян Г. А., Саркисян А. С. Температурная зависимость кремниевых планарных магнитодиодов // Известия АН АрмССР. Физика. 1982. Т. 17. – С. 27–81.
30. Зайцев Ю. В., Марченко А. Н., Ващенко В. И. Полупроводниковые резисторы в электротехнике. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136 с.

31. Зотов В. Д. Магниточувствительные Z-элементы с частотно-импульсным выходом // Приборы и системы управления. № 6, – с. 51; № 7, – с. 51, 1997
32. Использование устройства KMZ-10. Инструкция по эксплуатации фирмы «Valvo». 1988. – 26 с. (Пер. ст. из журнала «Electronic Components and Applications», 1988, vol/8, #4. – Pp. 22–39).
33. Каракушан Э. И., Стафеев В. И. Магнитодиоды // ФТТ. Т. 3, № 3, 1961. – 677 с.
34. Карпенков С. Х., Раков Б. М. Вопросы экранирования, расчета и применения тонкопленочных магнитных элементов // Зарубежная радиоэлектроника, № 10, 1977. – С. 3–6.
35. Карпенков С. Х. Тонкопленочные магнитные преобразователи. – М.: Радио и связь, 1985. – 208 с.
36. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы: Пер. с польского // Под. ред. О. К. Хомерики. – М.: Энергия, 1971. – 351 с.
37. Кордич С. Интегральные кремниевые датчики магнитного поля. (Пер. с англ. Ст. из журнала «Sensors & Actuators». 1986, № 10. – Pp.34–78.)
38. Котенко Г. И. Магниторезисторы. – Л.: Энергия. Ленинградское отделение, 1972. – 79 с.
39. Кремниевый датчик Холла ДХП-12ПК. Информационный листок о научно-техническом достижении. № 88. – 80 с. Московский областной территориальный центр научно-технической информации и пропаганды. 1988.
40. Левитас Н. С., Регаускас А. В. Магнитотранзисторы на основе полевого гальваномагниторекомбинационного эффекта // Приборы и системы управления, № 1, 1978. – С. 3–5.
41. Лещенко Г. И. Преобразователь угла поворота вала в код. Описание а. с. номер 796890 СССР. Оpubл. 1981. Бюлл. № 2.
42. Магнитодиоды. Проспект фирмы «Sony». 1980.
43. Магниторезисторы СМ4-1. Технические условия ОЖО.468.376 ТУ, 1981.
44. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
45. Марченко А. Н., Свечников С. В., Смовж А. К. Полупроводниковые сенсорные потенциометрические элементы. – М.: Радио и связь, 1988. – 192 с.
46. Мирзабаев М. М., Потаенко К. Д. и др. Эпитаксиальные датчики Холла и их применение. – Ташкент. ФАН Уз. ССР, 1986. – 214 с.
47. Молин Дж., Геске М. Л. Эффект Холла в кремниевых схемах. Пер. с англ., 1980. – 30 с. //The Hall Effect and its application. 1980. – Pp.421–445.
48. Мордкович В. Н., Приходько П. С., Бараночников М. Л., Завьялов А. В., Кузин А. Ю. Полевой датчик Холла на основе структур кремний на изоляторе // Автоматизация и современные технологии, № 5, 1998.
49. Нефедов А. В. Зарубежные аналоговые микросхемы и их аналоги. Справочник. Том 4. РадиоСофт. 2000. – С.23–54
50. Новые магниточувствительные элементы на базе германиевого микропровода. Экспресс- информация, вып.6. – М.: ЦНИИТЭИ приборостроения, 1977. – 16 с.
51. Осадчий Е. П., Карпов В. И. Тезаурус датчиков. Учебное пособие. ПГТУ. Пенза. 1995. – 68 с.
52. Осита М. Магнитные датчики. Пер. с японск // Денси гидзюцу. Т.25, № 5, 1983. – С. 11–20.
53. ОСТ 16.0.689.020-80. Датчики Холла. Термины, определения и буквенные обозначения основных величин. – 36 с.
54. Паринов Е. П., Кружанов Ю. В. Магнитодиоды КД301А...КД301Ж и их применение // Электронная промышленность, № 3, 1973. – 44 с.
55. Перельман Б. Л. Полупроводниковые приборы. Справочник. – М: СОЛОН МИКРОТЕХ, 1996. – 176 с.
56. Подлепецкий Б. Интегральные полупроводниковые сенсоры: состояние и перспективы разработок //CHIP NEWS, № 5, 1998. – С. 3–5.
57. Пожела Ю. К., Сашук А. П. Магнитоконцентрационные эффекты. – Вильнюс: Институт физики полупроводников АН Лит. ССР, 1983. – 44 с.
58. Полевые датчики Холла. Проспект АОЗТ «ЛБС». –М: 1998.
59. Полупроводниковые преобразователи // Под. ред. Ю. Пожелы. – Вильнюс: Моклас, 1980. – 73 с.
60. Полупроводниковый ферромагнитотранзистор типа М2АПК0522. Рекламный листок. Информприбор. 1989.
61. Попович Р. С., Хельг Б. Нелинейные эффекты в холловских приборах и их компенсация. Пер. статьи из журнала «Solid State Electronics». – 1988. Vol. 31. – Pp. 1681–1688.
62. Преобразователи Холла типа ПХЭ. Рекламный проспект. ELORG. – М.: 1986.
63. Румени Ч. С., Костев П. Т. Трехполюсный датчик. 1985. – 6 с. Пер. ст. из журнала «L'Academie Bulgare des Sciences Comptes Rendus», 1985, vol. 38, #9. – Pp. 1144–1148.
64. Семенов Н. М., Яковлев Н. И. Цифровые феррозондовые магнитометры. – Л.: Энергия, 1978. – 168 с.
65. Стафеев В. И., Каракушан Э. И. Магнитодиоды. – М.: Наука, 1975. – 216 с.
66. Тумански С., Страбовски М. Оптимизация и конструкция магниторезистивных датчиков с полюсом Барбера. (Пер. статьи из журнала «Sensor and Actuators», 1985, № 7. – Pp. 285–295.)
67. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. – М.: Энергоиздат, 1986. – 136 с.

68. Хофман Дж. Р., Хилл Е. В., Бэртуистл Дж. К. Тонкопленочные магниторезистивные векторные датчики с субмикронной шириной зазора. Пер. статьи из журнала «IEEE, Transactions». 1984. Vol.20, #5. – Pp. 59–95.
69. Чаплыгин Ю. А., Галушков А. И. Введение в технологию кремниевых микро электронных датчиков. Учебное пособие. – М.: МИЭТ, 1996. – 62 с.
70. Элементы чувствительные электронных датчиков. Классификация и система условных обозначений. Проект ОСТа для МЭП СССР, 1991. – 4 с.
71. Эффект Виганда в теории и практике (авт. Kuers G. H.). Пер. с англ. ВЦП № КЛ-76677. 1982. – 16 с.
72. Эффект Виганда и его применение. (авт. Kuers G. H.). Пер. с англ. ВЦП № Е-7895. 1982. – 17 с.
73. Эффект Виганда и его применение: эффект магнитной коммутации (авт. Dance B.). Пер. с англ. ВЦП № В-42295. 1982. – 9 с.
74. Эффект Виганда: генерирование магнитных импульсов для самых разнообразных применений в промышленности и торговле. ЦНИИТЭ Приборостроения, № 20/79. – 15 с.
75. Handbook. File under Discrete Semiconductors. SC17. Data Sheet General. Magnetic field sensors. Discrete Semiconductors. «Philips Semiconductors». 1998 Jun 12. – 58 p.
76. Apteurs magnetoresistifs. KMZ10A, KMZ10B, KMZ10C.) Каталог фирмы «RTC»).
77. Automotive Solid State Sensors. Preliminary Document. 1.5 W Gear Tooth Sensor. Проспект фирмы «Honeywell». 1999. – 2 p.
78. Baranochnikov M., Krasnikov G., Mordkovich V. et al. Magnetically Controlled Logic Cell // United States Patent # 5,542,080. Date of Patent: Apr. 21, 1998.
79. CEE Staff Report. Hall Effect devices. Chips that switch with magnetic field // Canadian Electronics Engineering, november, 1987. – Pp. 2–7.
80. Components and materials. Petrmanent magnet materials. Data handbook. Philips. 1976. – Pp. 2–28 (Каталог фирмы «Philips»).
81. Earth Magnetic Field Sensor EMF-01. Проспект фирмы «Xensor Integration bv». 2000. – 2 p.
82. Giant Magneto Resistive Position Sensor GMR S4. Проспект фирмы «Siemens». 1999. – 3 p.
83. Giant magnetoresistive (GMR) sensors. NVE Sensor Engineering and Application Notes (9-10-98 revision. doc Revised – 9/10/98). Материал фирмы NVE. 1998. – 44 p.
84. Hall Generators. 1995. (Каталог фирмы «Magnet-Physik»).
85. Hall Effect Transducers. How to apply them as sensors. MICRO SWITCH a Honeywell Division, 1988. – 280 p.
86. Instrumentation Amplifier Application Guide. 2nd Edition. Analog Devices. 1992. – 50 p.
87. Kuze N., Shibasaki I. MBE research and production of Hall sensor. «III-Vs Review». Vol.10. No.1. 1997. – Pp. 2–12.
88. Lemme H., Blossfeld L. Hall-Sensoren in CMOS-billig und genau // Electronic, #17, 1992. – Pp. 15–20.
89. Linear / Angular Displacement Sensor HMC1501. Проспект фирмы «Honeywell». 1999. – 2 p.
90. Linear Output Magnetic Field Sensore AD22151. Проспект фирмы «Analog Devises». 1999. – 8 p.
91. Magnetic field sensor KMZ41. Проспект фирмы «Philips Semiconductors». 1999. – 8 p.
92. Magnetic field sensor KMZ50. Проспект фирмы «Philips Semiconductors». 1999. – 8 p.
93. Magnetic Sensor Products Overview. HMC1001, 1002, 1021, 1022, HMC1021/22, HMC2003, HMR3000. Проспект фирмы «Honeywell». 1998. – 8 p.
94. Magnetic Sensors. For GaAs Hall Sensors linear and annular Magneto Resistors position sensing. Opto Semiconductors. The customers' partner of choice. Проспект фирмы «Siemens». 1999. – 8 p.
95. Magnetic Sensors. Giant Magneto Resistors. Проспект фирмы «Siemens». 1999. – 19 p.
96. Magneto-Inductive (MI) sensors. Проспект фирмы «Precision Navigation Inc.». 1999. – 3 p.
97. Manley M. H., Bloodworth G. G. and Bahnas Y. Z. Novel magnetic-field sensor using carrier domain rotation: operating and practical performance // Electron. Lett., 12 (1976). – Pp. 11–16.
98. Manley M. H., Bloodworth G. G. The carrier domain magnetometer: a novel silicon magnetic-field sensor // Solid-State Electron Dev., 2 (1978). – Pp. 17–84.
99. Michael J. Caruso. Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems. Материал фирмы «Honeywell», 1999. – 8 p.
100. MICRO SWITCH. Sensing and Control. Solid State Sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1997.
101. Microelectronic Integrated System. Applications and Databook. «Melexis». 1999. – 116 p.
102. Model 543. High Speed Digital-Orientation Sensor. Проспект фирмы «Applied Physics Systems», 1999. – 1 p.
103. One and two axis magnetic sensors HMC1001 HMC1002. Проспект фирмы «Honeywell». 1999. – 8 p.
104. Pression Single Supply Instrumentation Amplifier. Analog Devices. 1997. – 16 p.
105. Prognosis Theoretical Phisics, 1962, # 27 (4). – P. 772.
106. Siemens Component Service. Preferred Products 1977. – Pp. 1–3
107. Siemens Component Service. Preferred Products 1997. (Каталог фирмы «Siemens Aktiengesrllschaft».)
108. Solid State Sensors. Position, current, flow, liquel level and temperature sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1989. – Pp. 4–48.
109. Vig R., Dewey R. Hal Effect Sensor Gain Acceptance // Sensor, January, 1990. – Pp. 3–5.
110. Yoshino Y., Ao K., Kato M., Mizutanis // SAF Techn. Pap. Ser, 1987, № 870470. – Pp. 3–6.

111. Novel semiconductor sensitiv element based on the z-effect intended for various robotic sensors and systems / V. Zotov, V. Bodrov, E. Vinogradova et al // Proc. Of the II International symposium on measurement and control in robotic ISMCR. 1992. – Tsukuba, Japan. – Pp. 723–728.

Глава 3. Магниточувствительные и магнитоуправляемые ИС

Магнитоуправляемые и магниточувствительные интегральные схемы представляют собой особый класс современных изделий микромагнитоэлектроники.

Эти схемы содержат в одном полупроводниковом кристалле интегральный преобразователь магнитного поля (элемент Холла, магнитотранзистор или магниторезистор и т.п.) и электронную схему усиления и обработки сигнала. За рубежом такие изделия называют схемами Холла (Holl-effect integrated circuits).

В мире освоен выпуск двух больших групп ИС: *магниточувствительных* и *магнитоуправляемых микросхем* [4, 5, 11, 12, 18, 19, 21, 60]. Основные параметры, термины и определения, применяемые для оценки качества магниточувствительных и магнитоуправляемых интегральных схем, приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Основные параметры, термины и определения, применяемые для оценки качества магниточувствительных и магнитоуправляемых интегральных схем

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение (альтернативное обозначение)	Единица измерения	Определение
Напряжение питания	U_{Π} (U_{CC}) (U_S) (V_S) (V_{BUS}) (V_{CC}) (V_{DD})	В	Постоянное напряжение, приложенное к выводам питания микросхемы.
Номинальное напряжение питания	$U_{\Pi.НОМ.}$	В	Постоянное напряжение, приложенное к входным выводам микросхемы, при котором обеспечиваются номинальные параметры при её длительной работе.
Ток потребления начальный МЧМС	$I_{\Pi.НАЧ.}$ (I_{CC})	А мА	Ток, потребляемый микросхемой при номинальном напряжении питания, и до воздействия магнитного поля. (при $B = 0$).
Максимальный выходной ток	$I_{ВЫХ.МАКС}$ ($I_{O.МАХ}$) (I_Q) (I_{OLM})	А мА	Максимально допустимое значение выходного тока МЧМС или МУМ, не вызывающее необратимых изменений микросхемы.
Максимальная электрическая мощность, рассеиваемая микросхемой	$P_{\text{макс}}$	Вт мВт	Мощность при которой отклонение параметров микросхемы от номинальных значений не превышает установленных пределов при длительной работе.
Выходное напряжение	$U_{ВЫХ}$ (U_{OUT}) (U_O) (V_Q) (V_O) (V_{OQ})	В	Напряжение на выходе МЧМС или МУМ при заданной величине индукции управляющего магнитного поля. ($B=0$ или $B=B_{НОМ}$)
Максимальное выходное напряжение	$U_{ВЫХ.МАКС}$ ($U_{OUT.МАХ.}$) (V_{OH})	В	Предельное значение выходного напряжения МЧМС при котором линейность преобразования остается в пределах нормируемого значения.
Минимальное выходное напряжение	$U_{ВЫХ.МИН.}$ (V_{OL})	В	Минимальное значение выходного напряжения МЧМС при котором линейность преобразования остается в пределах нормируемого значения.
Чувствительность микросхемы по напряжению (Крутизна преобразования по напряжению)	S_U (S_B) (S)	В/Тл мВ/мТл мВ/гс	Отношение приращения выходного напряжения ($U_{вых}$) к величине индукции магнитного поля (B), вызвавшего это приращение.
Чувствительность микросхемы по току (Крутизна преобразования по току)	S_I (S_a) (S)	А/Тл мА/мТл мА/гс	Отношение приращения выходного тока ($I_{вых}$) к величине индукции магнитного поля (B), вызвавшего это приращение.
Номинальное значение индукции управляющего магнитного поля	$B_{НОМ.}$	мТл Тл гс	Предельное значение индукции управляющего магнитного поля при котором гарантируется заданная линейность преобразования МЧМС.

Продолжение таблицы 3.1.

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение (альтернативное обозначение)	Единица измерения	Определение
Ток потребления МУМ	$I_{П.НОМ.}$ (I_{CC}) (I_S) (I_{DD})	А мА	Ток, потребляемый магнитоуправляемой микросхемой при номинальном напряжении питания и уровне «1» на выходе. Ток, потребляемый магниточувствительной ИС, при номинальной нагрузке. ($R_H = R_{НОМ.}$).
Ток коммутации МУМ	$I_{КОМ.}$ (I_{SW}) (I_{LS}) (I_Q)	А мА	Допустимое значение тока, протекающего через открытый выходной транзистор (или ключ) микро-схемы.
Коммутируемое напряжение МУМ	$U_{КОМ.}$ (U_{SW}) (U_{LS})	В	Допустимое значение напряжения на коллекторе закрытого выходного транзистора магнитоуправляемой микросхемы.
Выходное напряжение низкого уровня МУМ	$U_{ВЫХ}^0$ ($U_{ВЫХ.}^L$) (U_{OL}) (V_{CLH})	В	Напряжение на выходе магнитоуправляемой микросхемы, соответствующее логическому «0».
Выходной ток низкого уровня МУМ	$I_{ВЫХ.}^0$ ($I_{ВЫХ.}^L$) (I_{OL}) (I_{QL}) (I_{Slow})	мА мкА	Выходной ток магнитоуправляемой микросхемы, соответствующий логическому «0»
Выходное напряжение высокого уровня МУМ	$U_{ВЫХ.}^1$ ($U_{ВЫХ.}^H$) (U_{OH}) (V_{CHL})	В	Напряжение на выходе магнитоуправляемой микросхемы, соответствующее логической «1».
Выходной ток высокого уровня МУМ	$I_{ВЫХ.}^1$ ($I_{ВЫХ.}^H$) (I_{OH}) (I_{QH}) (I_{Shigh})	А мА	Выходной ток магнитоуправляемой микросхемы, соответствующий логической «1».
Индукция срабатывания МУМ	$B_{СРАБ.}$ (B_{OP}) (ΔB_{Onbb})	Тл мТл Гс	Значение индукции внешнего магнитного поля, при котором происходит переключение выходного уровня с высокого на низкий.
Индукция отпускания МУМ	$B_{ОТП.}$ (B_{RP}) (ΔB_{OFFbb})	Тл мТл Гс	Значение индукции внешнего магнитного поля, при котором происходит переключение выходного уровня с низкого на высокий.
Гистерезис магнитный МУМ	ΔB (ΔB_{HY}) (B_{HYS}) (ΔB_{HYS})	мТл Гс	Разность между индукцией срабатывания и отпуска-ния МУМ.
Время включения МУМ	$t_{ВКЛ.}$ (t_{TLH}) ($T_{ВКЛ.}$) (t_r) (t_{plh})	мкс нс	Интервал времени, в течение которого напряжение на выходе магнитоуправляемой микросхемы изменяется от высокого уровня к низкому (измеряется при 0,1 и 0,9 от номинального значения напряжения).
Время выключения МУМ	$t_{ВЫКЛ.}$ (t_{THL}) ($T_{ВЫКЛ.}$) (t_f) (t_{phi})	мкс нс	Интервал времени, в течение которого напряжение на выходе магнитоуправляемой микросхемы изменяется от низкого уровня к высокому (измеряется при 0,1 и 0,9 от номинального значения напряжения).
Максимальная частота срабатывания МУМ	$F_{макс}$ (F_{CLK})	Гц кГц	Максимальная частота срабатывания МУМ при которой происходит уверенное срабатывание её выходного каскада.

Продолжение таблицы 3.1.

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение (альтернативное обозначение)	Единица измерения	Определение
Предельная рабочая частота МЧМС	$f_{\text{МАКС}}^*$ (f_c)	Гц кГц МГц	Предельная частота синусоидально модулированного магнитного потока, при котором чувствительность магниточувствительной микросхемы падает до значения 0,707 от чувствительности при немодулированном потоке.
Рабочая полоса частот МЧМС	$f_{\text{РАБ}}$ (Δf) (BW)	Гц кГц МГц	Полоса частот синусоидально модулированного магнитного потока, при котором чувствительность магниточувствительной микросхемы падает до значения 0,707 от чувствительности при немодулированном потоке.
Предельный интервал индукций управляющего магнитного поля МЧМС	$B_{\text{МАКС}}$	Тл мТл гс	Максимальное значение индукции магнитного поля при котором нелинейность преобразования не превышает установленной в паспорте нормы. Определяется графическим путем по энергетической характеристике МЧМС.
Тепловое сопротивление конструкции МЧМС или МУМ	λ (G_{th}) $R_{\text{th JA}}$	Вт/°С (Вт/°К) К/Вт	Показатель, который характеризует конструкцию микросхемы и определяется по формуле: $\lambda = P_{\text{МАКС}} / (T_{\text{МАКС}} - T_A)$ Где $T_{\text{МАКС}}$, T_A - предельная и рабочая температура преобразователя; $P_{\text{МАКС}}$ - максимально допустимая мощность, рассеиваемая преобразователем.

3.1. Магниточувствительные интегральные схемы

Выходной сигнал преобразователя магнитного поля (элемента Холла или магниторезистора) очень небольшой и составляет единицы милливольт. Для дальнейшего использования такого сигнала его необходимо усилить. Наиболее просто это выполняется путем интегрирования на одном и том же кристалле усилителя сигнала и, например, элемента Холла. Устройства такого рода называют магниточувствительными интегральными микросхемами.

Магниточувствительные схемы (МЧМС) относятся к аналоговым (линейным) интегральным микросхемам и являются преобразователями магнитного поля в выходной сигнал (напряжение, ток), пропорциональный величине индукции воздействующего магнитного поля. При использовании в качестве ПМП элемента Холла в зарубежных источниках магниточувствительные ИС иногда называют «LOHET» (Linear Output Hall Effect Transducer – преобразователь с линейным выходом на основе эффекта Холла).

Принцип работы магниточувствительных ИС можно пояснить на примере одного из первых вариантов интегрального магнитоприемного устройства – *магнитного датчика дифференциального усиления* (DAMS – Differential Amplification Magnetic Sensor). Электрическая схема такого устройства приведена на рис. 3.1.

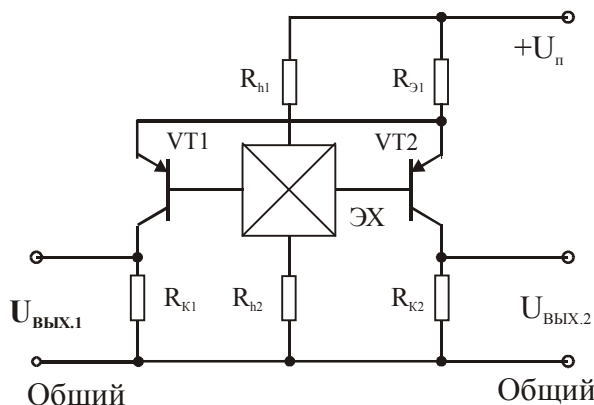


Рис. 3.1. Электрическая схема интегрального магнитоприемного устройства типа DAMS

В данной схеме сигнал с элемента Холла поступает на базы транзисторов VT1 и VT2 и преобразуется в разность токов эмиттеров указанных транзисторов. Разность токов их коллекторов в конечном счете преобразуется в разность напряжений, выделяемых на сопротивлениях нагрузки R_{K1} и R_{K2} . Эта разность напряжений и является выходным сигналом устройства [12].

На рис. 3.2.а приведена типовая функциональная схема простейшей МЧМС, которая состоит из интегрального элемента Холла, стабилизатора напряжения, дифференциального усилителя (ДУ) и эмиттерного повторителя на транзисторе VT1. На рис. 3.2.б дана электрическая схема технической реализации такой ИС.

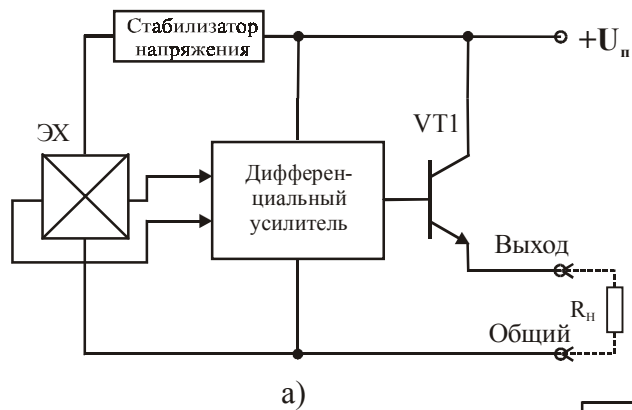


Рис. 3.2.а. Функциональная схема простейшей магниточувствительной ИС

Рис. 3.2.б. Пример технической реализации функциональной схемы простейшей магниточувствительной ИС. Диоды VD1–VD4 выполняют роль стабилизатора напряжения

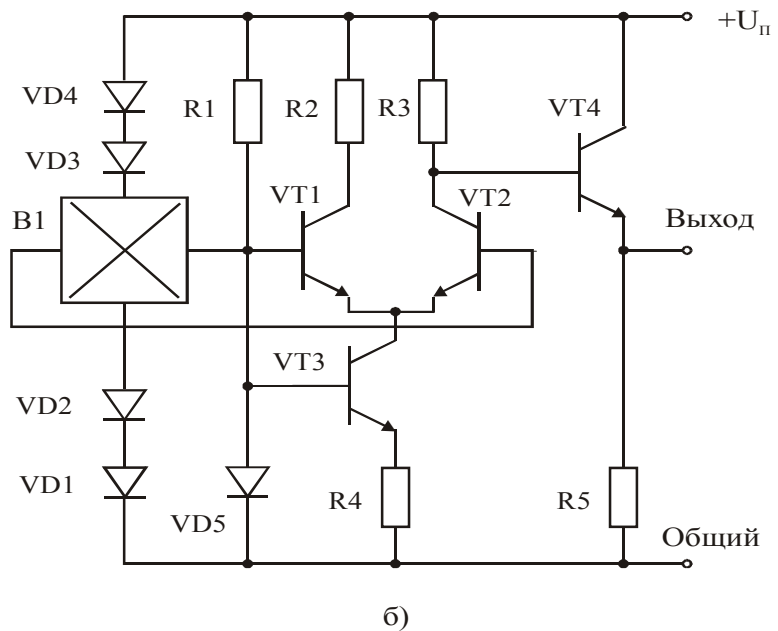


Схема (рис. 3.2.б) работает следующим образом. При отсутствии внешнего магнитного поля напряжение на выходе микросхемы $U_{\text{ВЫХ}}$ должно быть равно нулю. Однако относительно земли выходное напряжение не равно нулю, поскольку МЧМС работает от однополярного источника питания.

Если внешнее магнитное поле $B = 0$, то дифференциальное входное напряжение между входами дифференциального усилителя равно нулю, но выходное синфазное напряжение $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СМ}} = U_{\text{П}}/2$, то есть составляет половину напряжения источника питания.

Напряжение на выходе элемента Холла есть функция тока управления ($I_{\text{УП}}$) ЭХ. Так как стабилизатор напряжения обеспечивает постоянство тока управления $I_{\text{УП}} = \text{const}$, то при воздействии управляющего магнитного поля выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ будет пропорционально только индукции этого поля B .

Магнитное поле B , принимаемое элементом Холла, может быть как положительным, так и отрицательным. В результате этого изменение выходного напряжения ДУ тоже может быть положительным или отрицательным относительно уровня покоя $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{СМ}}$ (при $B = 0$), где $U_{\text{СМ}} = U_{\text{П}}/2$.

Основным параметром МЧМС является ее чувствительность (S), определяемая как отношение изменения выходного напряжения или выходного тока к изменению индукции управляющего магнитного поля B .

$$S_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{B}, \text{ В/Тл} \quad (3.1)$$

или

$$S_I = \frac{\Delta I_{\text{ВЫХ}}}{B}, \text{ А/Тл} \quad (3.2)$$

где $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ – изменение выходного напряжения;
 $\Delta I_{\text{ВЫХ}}$ – изменение выходного тока;
 B – индукция управляющего магнитного поля.

Чувствительность МЧМС зависит от напряжения питания и температуры. На рис. 3.3.а,б приведены выходные характеристики типовой магниточувствительной микросхемы при различных напряжениях питания и различной температуре.

В необходимых случаях для термостабилизации основных параметров ИС используются специальные схемотехнические решения и технологические приемы.

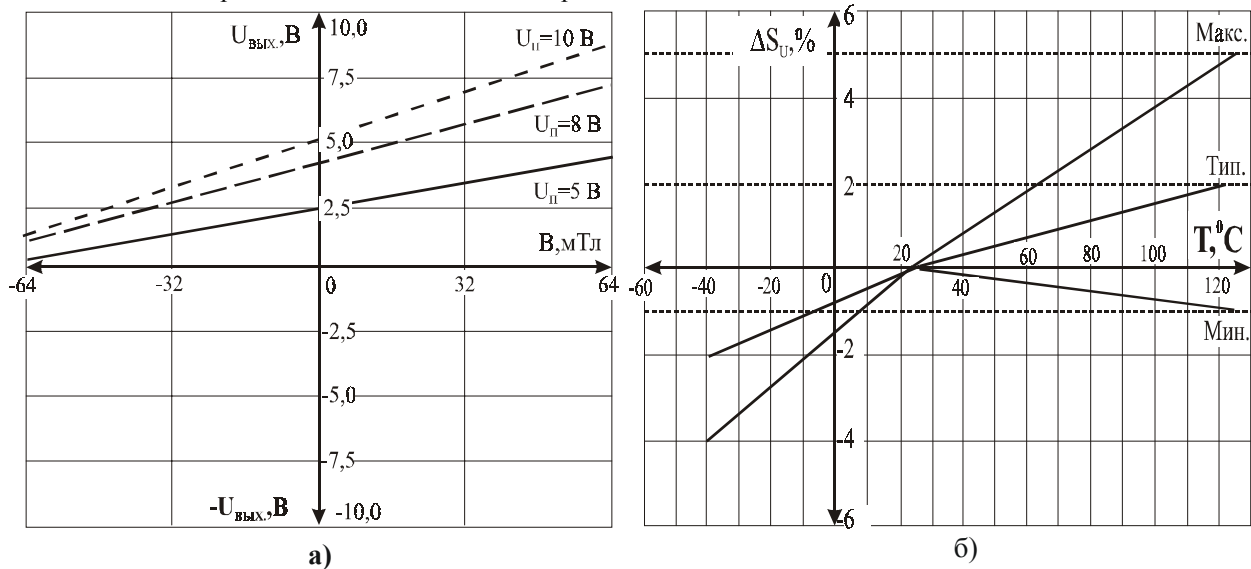


Рис. 3.3. Выходные характеристики типовой МЧМС: а – при различном напряжении питания; б – при различной температуре, где $\Delta S_{\text{у}}$ – относительное изменение чувствительности ИС

Магниточувствительные микросхемы можно условно разделить на три группы: микромощные, маломощные и мощные.

Примерная классификация магниточувствительных микросхем приведена в табл. 3.2.

Таблица 3.2. Примерная классификация магниточувствительных микросхем

Основные параметры, единицы измерения	Условная группа микросхем		
	Микромощные	Маломощные	Мощные
Напряжение питания, В	2,0...5,5	2,5...30	4,5...50
Выходной ток начальный, мА, не более	0,1	1...6	5...20
Выходной ток максимальный, мА, не менее	10	30...50	50...1000
Чувствительность микросхемы по току, А/Тл (мА/мТл)	10...100	10...300	20...500
Чувствительность микросхемы по напряжению, В/Тл	1...500	20...600	20...500
Предельный интервал индукций, Тл, не менее	-0,1...+0,1	-0,2...+0,2	-0,3...+ 0,3
Нелинейность характеристики преобразования, %, не	0,1...5,0	0,01...5,0	0,5...10,0
Диапазон рабочих температур, °С	-10...+85	-60...+150	-60...+125

Функциональные схемы МЧМС весьма разнообразны и основаны на использовании схемотехники и технологии современных операционных усилителей и других более сложных устройств (АЦП, микропроцессоров и пр.). На рис. 3.4 приводятся несколько вариантов функциональных схем простых МЧМС. Эти схемы не требуют подробного обсуждения.

3.1.1. Промышленные образцы магниточувствительных микросхем

Отечественными предприятиями магниточувствительные интегральные микросхемы серийно не производились и пока не производятся.

В настоящее время КО «Кристалл» на Украине выпускает магниточувствительные ИС типа УА1101ХП30 (UA01ХП30) [14]. Основные параметры микросхем УА1101ХП30 приведены в главе 12 тома 2.

Зарубежными фирмами выпускается широкая номенклатура магниточувствительных (аналоговых) микросхем. В доступных источниках приводятся сведения о нескольких десятках типов МЧМС. Ведущими производителями магниточувствительных интегральных схем являются фирмы Sprague, Allegro MicroSystems Honeywell, Analog Devices, Texas Instruments Inc. (США), Matsushita Elec. Corp., Sharp, Densi (Япония), Micronas Intermetall, Melexis, Siemens, Ebeco (Германия) и др.

Основные параметры самых известных МЧМС, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, приводятся в главе 12 тома 2.

Наиболее совершенными образцами современных магниточувствительных микросхем являются МЧМС типа AD22151 (фирма Analog Devices), микросхемы серии SS490 (фирма Honeywell), микросхемы UGN 3501M (фирма Sprague), A3507–A3517 (фирма Allegro), КМОП микросхемы серий HAL400 и HAL800 (фирма Micronas Intermetall), микросхемы серии TLE 4910 (фирма Siemens), программируемые КМОП микросхемы типа MLX90215 (фирма Melexis) и др.

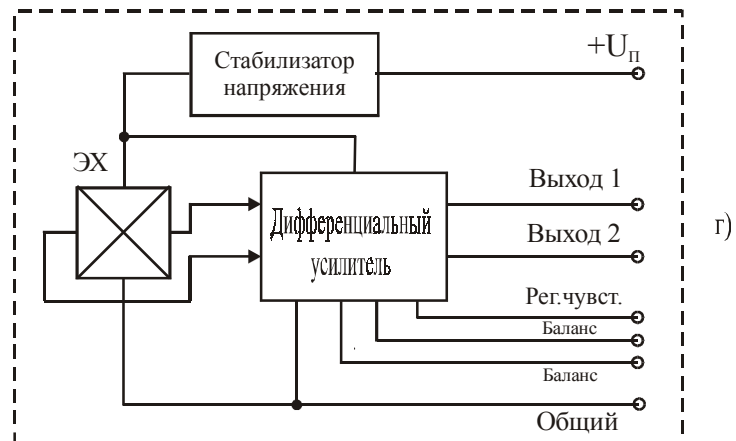
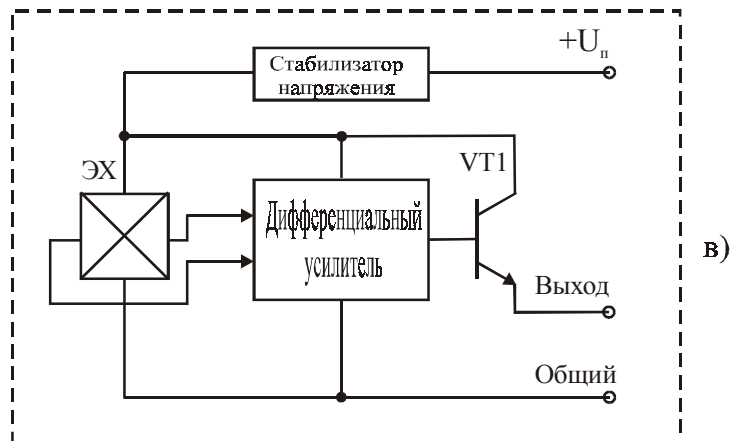
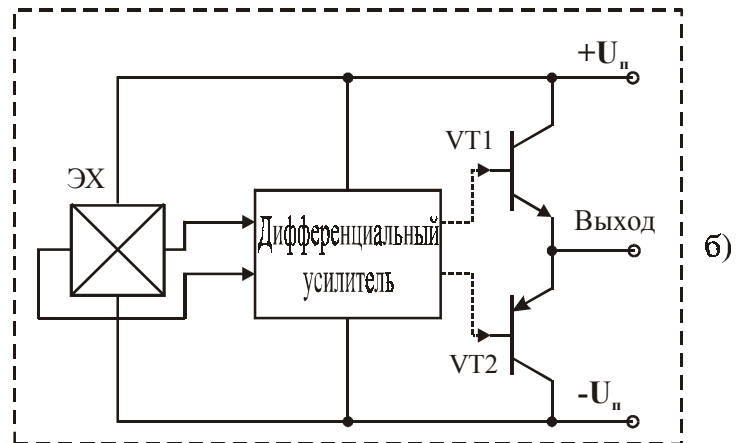
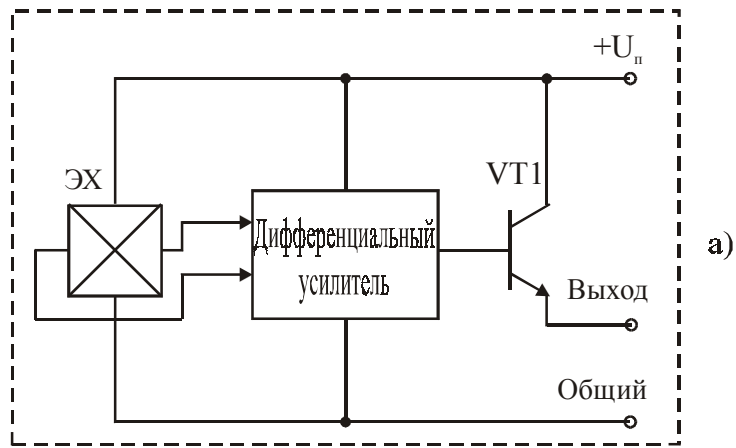


Рис. 3.4. Упрощенные функциональные схемы магниточувствительных ИС

Конструктивное оформление зарубежных магниточувствительных интегральных микросхем весьма разнообразно. Как правило, большинство МЧМС размещается в стандартных пластмассовых или металлокерамических корпусах тип SIP, SOIC, DIP, SSO, SOT, TO-226, Micropack и т.д.

Обобщенные параметры магниточувствительных микросхем зарубежного производства приведены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Обобщенные параметры магниточувствительных микросхем зарубежного производства

№ п/п	Наименование параметра, единица	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 4,0 до 16
2	Ток потребления, мА	от 3,5 до 10
3	Выходной ток, мА	0,5 до 10
4	Крутизна выходной характеристики, мВ/мТл	от 3,0 до 140
5	Рабочая полоса частот преобразования, Гц	от 0 до 25000
6	Нелинейность характеристики преобразования,	от $\pm 0,1$ до $\pm 5,0$

Рассмотрим подробнее несколько наиболее характерных вариантов магниточувствительных микросхем зарубежного производства.

Магниточувствительные микросхемы серии SS490

Среди современных магниточувствительных микросхем наиболее известными являются МЧМС серии SS490, выпускаемые фирмой Honeywell. Микросхемы этой серии предназначены для прецизионных измерений индукции магнитного поля, они делятся на пять типов: SS495A, SS495A1, SS495A2, SS496A и SS496A1. МЧМС данной серии отличаются высокой точностью калибровки основного параметра S_v и хорошей линейностью характеристики преобразования.

На рис. 3.5 приведена упрощенная функциональная схема и выходная характеристика МЧМС серии SS490, а в табл. 3.4 даны основные параметры ИС [35]. Другие характеристики микросхем серии SS490 рассматриваются в главе 12.

Микросхемы серии SS490 выпускаются в малогабаритных пластмассовых корпусах, в том числе и в варианте, предназначенном для автоматизированной установки на поверхность печатных плат.

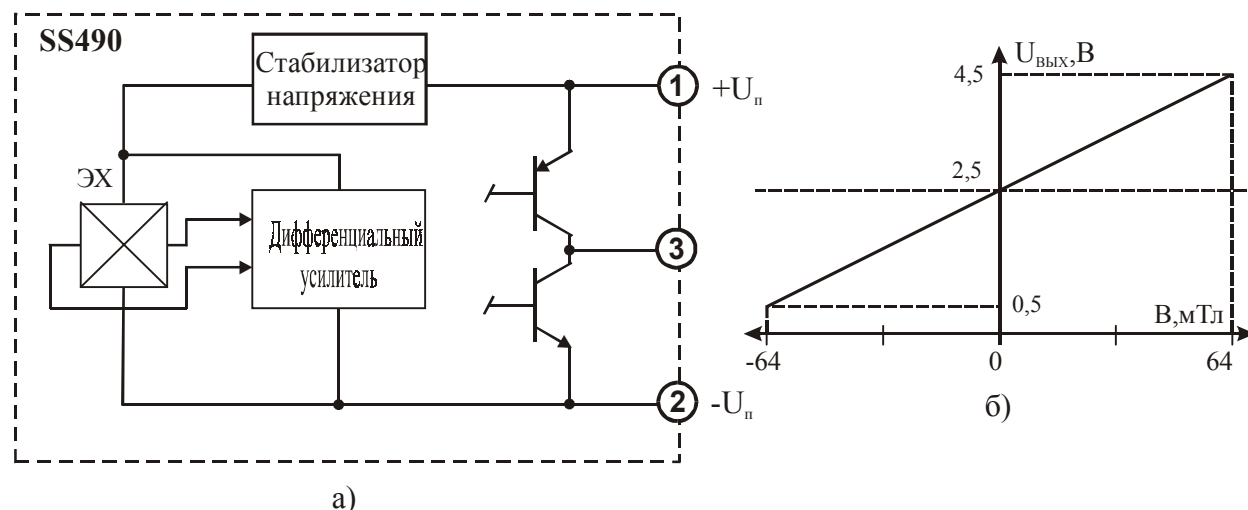


Рис. 3.5. МЧМС серии SS490: а – упрощенная функциональная схема; б – выходная характеристика

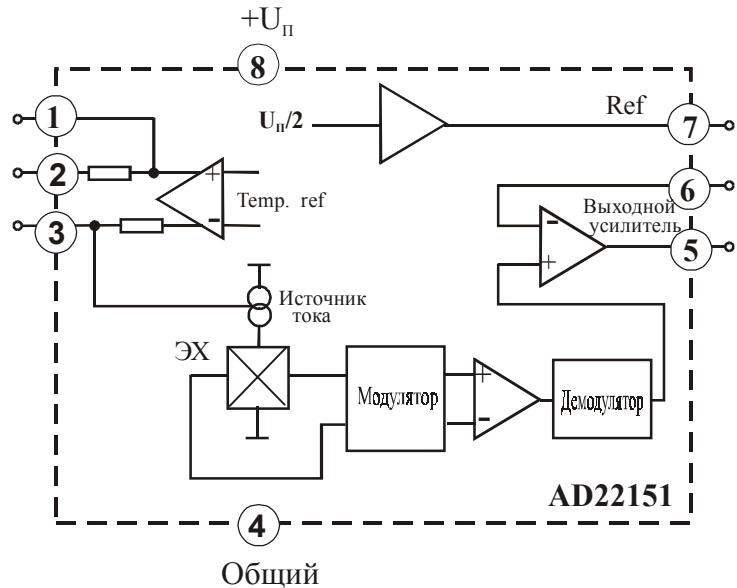
Таблица 3.4. Усредненные основные параметры МЧМС серии SS490 (фирма Honeywell)

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	4,5...10,5
2	Ток потребления, мА	7,0...8,7
3	Выходной ток, мА, не более	1,5
4	Чувствительность по напряжению, мВ/мТл	25...31
5	Рабочая полоса частот преобразования, Гц	0...25000 ($U_{\text{п}}=10$ В)
6	Нелинейность характеристики преобразования, %	-(1,0...1,5)
7	Динамический диапазон, мТл	± 67
8	Выходное напряжение при $B=0$, В	$2,5 \pm 0,1$
9	Температурный коэффициент чувствительности, $\%/^{\circ}\text{C}$	от -0,01 до +0,05
10	Температурный дрейф нуля, $\%/^{\circ}\text{C}$	$\pm (0,04...0,07)$
11	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	-40...+150
12	Габаритные размеры, мм ³	4,06 x 3,0 x 1,6

Магниточувствительные микросхемы AD22151

Более совершенным образцами современных магниточувствительных микросхем являются МЧМС типа AD22151, выпускаемые фирмой Analog Devices. Эти микросхемы предназначены для использования в высокочувствительных прецизионных магнитометрах и аналоговых магнитных датчиках различного назначения.

Рис. 3.6. Упрощенная функциональная схема магниточувствительной ИС типа AD22151



Функциональная схема МЧМС типа AD22151 приведена на рис. 3.6. Эта схема представляет собой сочетание интегрального элемента Холла и высококачественного инструментального усилителя. Для уменьшения влияния нестабильности холловского остаточного напряжения U_0 предусмотрена модуляция сигнала с ЭХ с последующей его демодуляцией. Подробнее см. [35, 36, 41]. Кроме того, микросхема имеет встроенный датчик температуры.

Схемотехника AD22151 позволяет производить регулировку чувствительности, установку напряжения смещения на выходе и настройку схемы термостабилизации параметров при помощи внешних двух или трех резисторов. Микросхемы отличаются высокой магнитной чувствительностью S_U , хорошей линейностью характеристики преобразования и термостабильностью основных параметров в широком диапазоне температур.

Основные параметры МУМС AD22151 приведены в табл. 3.5. Другие характеристики микросхем рассмотрены в главе 12 тома 2.

Таблица 3.5. Основные параметры МУМС типа AD22151 (фирма Analog Devices)

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	4,5...6,0
2	Ток потребления, мА	6...10
3	Выходной ток, мА, не более	5
4	Чувствительность по напряжению, мВ/мТл	4 ($K_U = 1$) 60 ($K_U = 15$)
5	Нелинейность характеристики преобразования, %	$\pm 0,1$
6	Динамический диапазон, мТл	± 600 ($K_U = 1$)
7	Выходное напряжение при $B=0$, В	$U_{п}/2$
8	Рабочая полоса частот преобразования, Гц	0 до 5700 ($S=50$ мВ/мТл)
9	Напряжение шума на выходе (при $B=0$), мВ	3, 2 ($\Delta F=250$ гц) 1,0 ($\Delta F=250$ гц)
10	Температурный коэффициент чувствительности, %/ $^{\circ}\text{C}$	$-(0,01...0,1)$
11	Температурный дрейф нуля, %/ $^{\circ}\text{C}$	от -0,04 до +0,18
12	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	-40...+150
13	Габаритные размеры, мм	5 x 4 x 1,75

Магниточувствительные микросхемы серии HAL400

Фирма Micronas Intermetall выпускает магниточувствительные микросхемы серии HAL400 в двух модификациях: HAL400 и HAL401. Микросхемы этой серии выполнены целиком по КМОП технологии. Они предназначены для прецизионных измерений индукции магнитного поля и отличаются высокой точностью калибровки основного параметра S_U и хорошей линейностью характеристики преобразования.

На рис. 3.7 приведена упрощенная функциональная схема, а на рис. 3.8 показана схема включения и выходная характеристика МЧМС серии HAL400. В табл. 3.6 даны основные параметры ИС. Другие характеристики микросхем серии HAL400 приводятся в главе 12 тома 2.

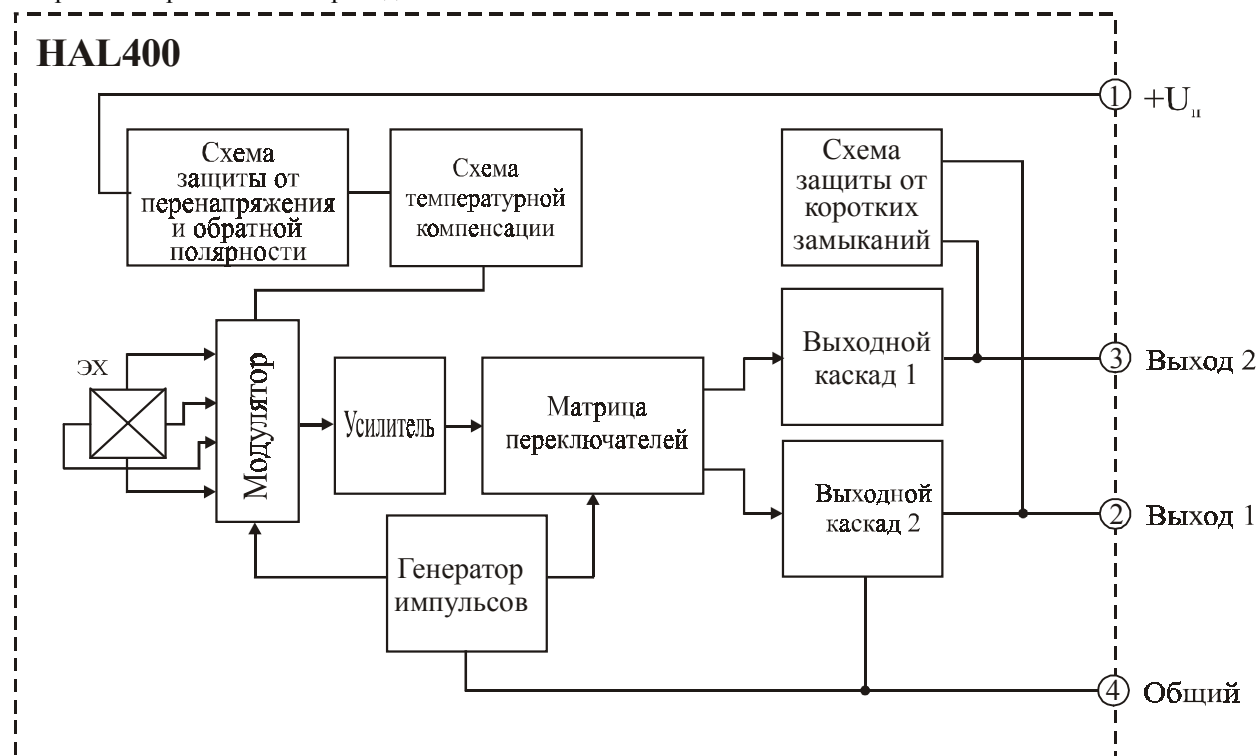


Рис. 3.7. Упрощенная функциональная схема магниточувствительной ИС серии HAL400

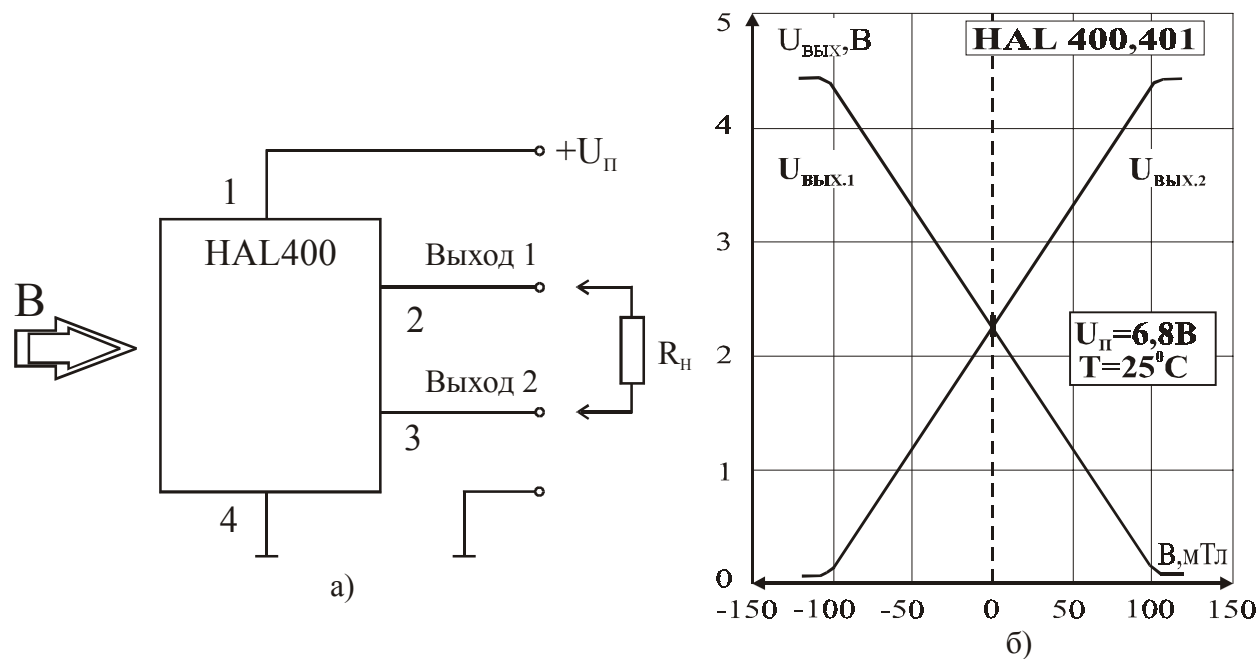


Рис. 3.8. Магниточувствительная ИС типа HAL400: а – схема включения; б – выходная характеристика

Для уменьшения влияния нестабильности холловского остаточного напряжения U_0 предусмотрена модуляция сигнала ЭХ с последующей его демодуляцией. Схема имеет встроенный стабилизатор напряжения и элементы защиты от короткого замыкания по выходу и от ошибочного включения источника питания обратной полярности. схем имеет два парафазных выхода, что обеспечивает возможность ее работы в дифференциальном режиме.

Микросхемы серии HAL400 выпускаются в малогабаритных пластмассовых корпусах и отличаются компактностью и малой толщиной корпуса, что позволяет размещать прибор непосредственно в магнитном зазоре контролируемых источников магнитного поля. Подробнее см. [29].

Таблица 3.6. Основные параметры магниточувствительных ИС серии HAL400

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	4,8...12
2	Ток потребления, мА	11...18
3	Выходной ток, мА, не более	50
4	Чувствительность по напряжению, мВ/мТл	37...50
6	Динамический диапазон, мТл	± 50 (HAL 400) ± 60 (HAL 401)
5	Нелинейность характеристики преобразования, %	$\pm 0,5...1,0$ (HAL 400) $\pm 0,5...2,0$ (HAL 401)
7	Выходное напряжение при $B=0$, В	2,1...2,3
6	Максимальное выходное напряжение при $B=B_{\text{макс}}$	0,6...0,8 (HAL 400) 0,6...1,3 (HAL 401)
8	Рабочая полоса частот преобразования, Гц	0...10000
9	Напряжение шума на выходе (при $U_C/U_{\text{ш}}=1$) и полосе пропускания $\Delta F=10...10000$ Гц, мкТл	>10
10	Температурный коэффициент чувствительности, мкТл/ $^{\circ}\text{C}$	± 15 (HAL 400) ± 25 (HAL 401)
12	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	-40...+170
13	Габаритные размеры, мм ³	4,55 x 2,6 x 1,53

Программируемые МЧМС типа HAL800

Наиболее совершенными и сложными по схемотехнике являются *программируемые магниточувствительные микросхемы*.

В качестве примера приведем краткую характеристику МЧМС типа HAL800, выпускаемых фирмой Micronas intermetall. Эти микросхемы выполнены целиком по КМОП технологии. Они предназначены для прецизионных измерений индукции магнитного поля и обладают высокими магнитоэлектрическими параметрами.

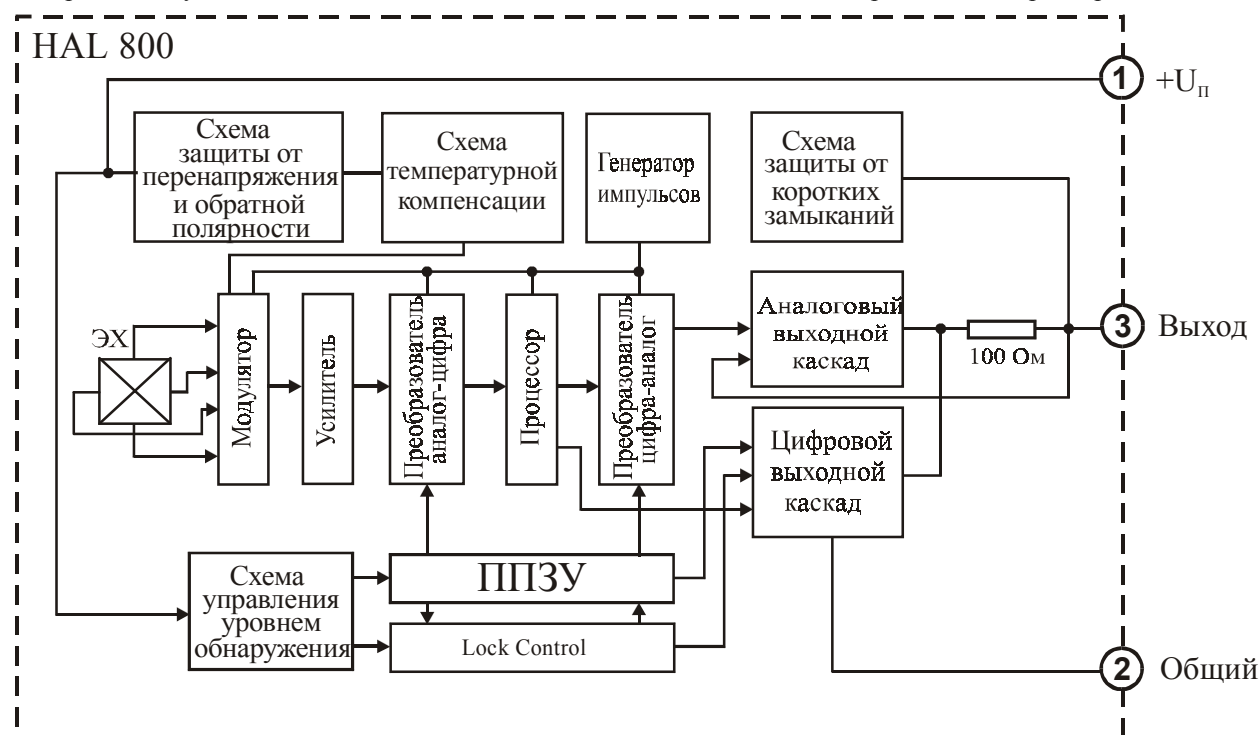


Рис. 3.9. Функциональная схема магниточувствительной ИС HAL800

На рис. 3.9 приведена упрощенная функциональная схема, а на рис. 3.10 дана выходная характеристика МУМС HAL800. В табл. 3.7 приведены основные параметры ИС.

Для уменьшения влияния нестабильности холлового остаточного напряжения U_0 предусмотрена модуляция сигнала ЭХ с последующей его демодуляцией. Схема имеет встроенный стабилизатор напряжения и элементы защиты от короткого замыкания по выходу и от ошибочного включения источника питания обратной полярности.

Схемотехника HAL800 позволяет оптимизировать основные параметры при решении конкретных технических задач. Оптимизация параметров производится путем программирования МЧМС.

Программирование схемы осуществляется путем подачи кодированного сигнала по цепи питания прибора. При этом могут программироваться динамический диапазон, магнитная чувствительность, полоса пропускания и коэффициенты, определяющие термостабильность МЧМС. Протокол программирования модулируется на выходе ИС. После подачи сигнала «Lock» происходит запоминание в СПЗУ всех параметров и схема переходит в рабочее состояние (см. рис. 3.11).

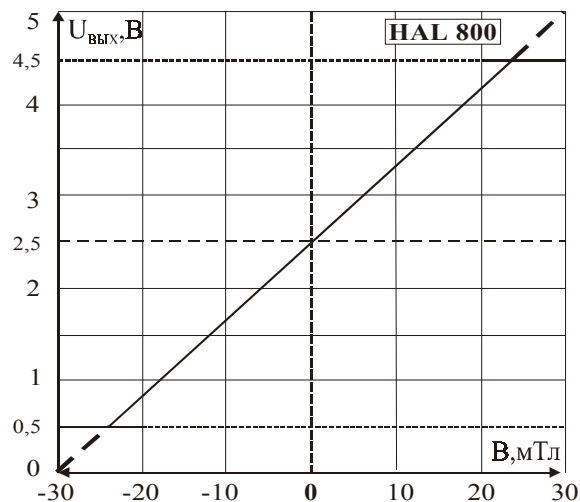


Рис. 3.10. Выходная характеристика магниточувствительной ИС типа HAL800

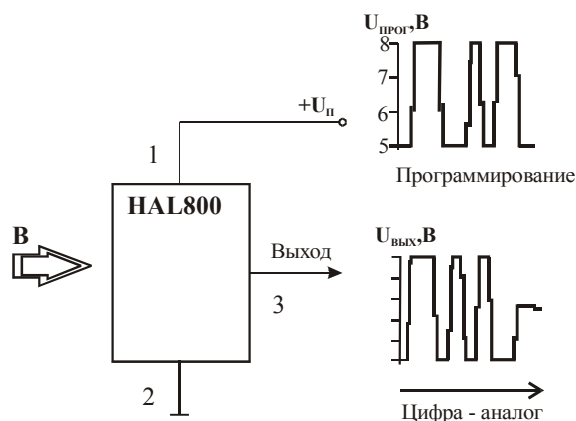


Рис. 3.11. Иллюстрация к принципу программирования HAL800

Микросхемы HAL800 выпускаются в малогабаритных пластмассовых корпусах и отличаются компактностью, что позволяет размещать прибор непосредственно в магнитном зазоре контролируемых источников магнитного поля.

Другие характеристики микросхем серии HAL800 приводятся в [28].

Таблица 3.7. Основные параметры магниточувствительных ИС серии HAL800

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 4,8 до 12
2	Ток потребления, мА	от 11 до 18
3	Выходной ток, мА, не более	50
4	Чувствительность по напряжению, мВ/мТл	от 37 до 50
6	Динамический диапазон, мТл	± 50 (HAL 400) и ± 60 (HAL 401)
5	Нелинейность характеристики преобразования, %	$\pm 0,5 \dots 1,0$ (HAL 400) и $\pm 0,5 \dots 2,0$ (HAL 401)
7	Выходное напряжение при $B=0$, В	от 2,1 до 2,3
6	Максимальное выходное напряжение при $B=B_{\text{макс}}$, В	0,6...0,8 (HAL 400) и 0,6...1,3 (HAL 401)
8	Рабочая полоса частот преобразования, Гц	0...10000
9	Напряжение шума на выходе (при $U_c/U_{\text{ш}}=1$) и полосе пропускания $\Delta F=10 \dots 10000$ Гц, мкТл	>10
10	Температурный коэффициент чувствительности,	± 15 (HAL 400) и ± 25 (HAL 401)
12	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	-40...+170
13	Габаритные размеры, мм ³	4,55 x 2,6 x 1,53

Основные параметры магниточувствительных микросхем, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами, приведены в главе 12 тома 2.

3.1.2. Применение магниточувствительных ИС

Магниточувствительные интегральные схемы применяются в аналоговых магнитных датчиках перемещения, в портативных магнитометрах, системах охранной сигнализации, в промышленном оборудовании, бытовой технике и др. Магниточувствительные ИС легко сопрягаются с другими активными элементами. Наиболее оптимальным является сопряжение МЧМС с интегральными операционными и инструментальными усилителями [31, 35, 37, 41].

Схемы сопряжения МЧМС с операционными усилителями

На рис. 3.12–3.23 приведено несколько типовых схем сопряжения магниточувствительных ИС с операционными усилителями. Схемы не требуют пояснений. В качестве ОУ, как правило, используются ИС малошумящих операционных усилителей.

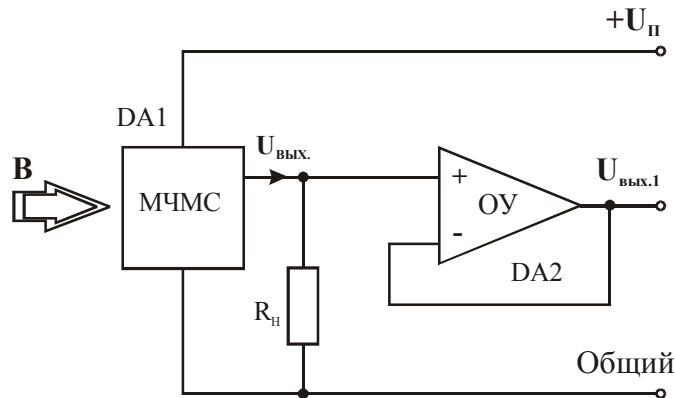


Рис. 3.12. Схема включения МЧМС с ОУ, работающим в режиме повторителя

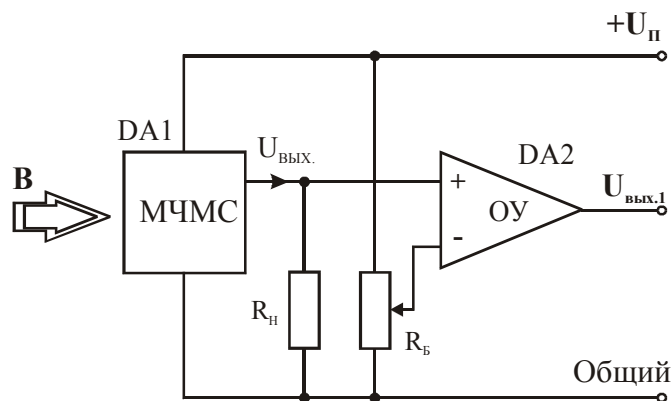


Рис. 3.13. Схема включения МЧМС с ОУ, работающим в режиме неинвертирующего компаратора (гистерезис $\Delta B = 0$)

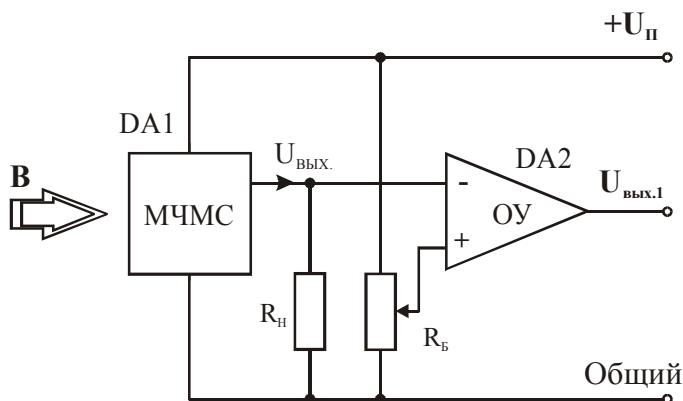


Рис. 3.14. Схема включения МЧМС с ОУ, работающим в режиме инвертирующего компаратора (гистерезис $\Delta B = 0$).

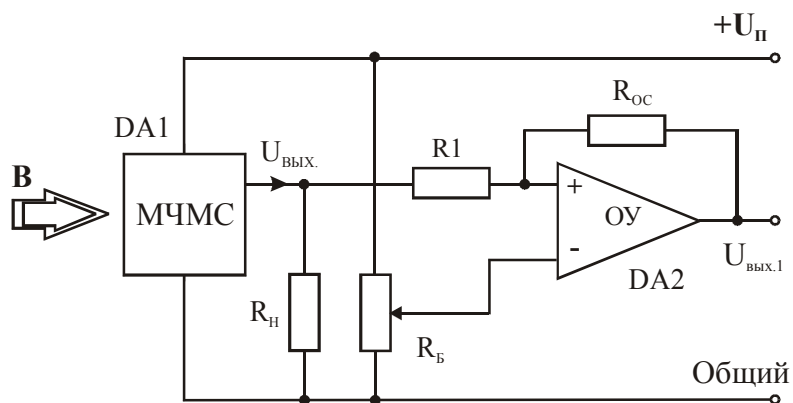


Рис. 3.15. Схема включения МЧМС с ОУ, работающим в режиме неинвертирующего компаратора с гистерезисом. Величина гистерезиса устанавливается резистором R_{OC}

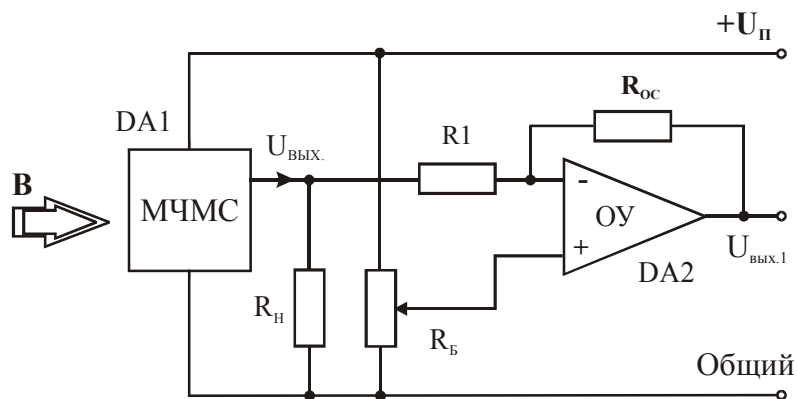


Рис. 3.16. Схема включения МЧМС с ОУ, работающим в режиме инвертирующего компаратора с гистерезисом. Величина гистерезиса устанавливается резистором R_{OC}

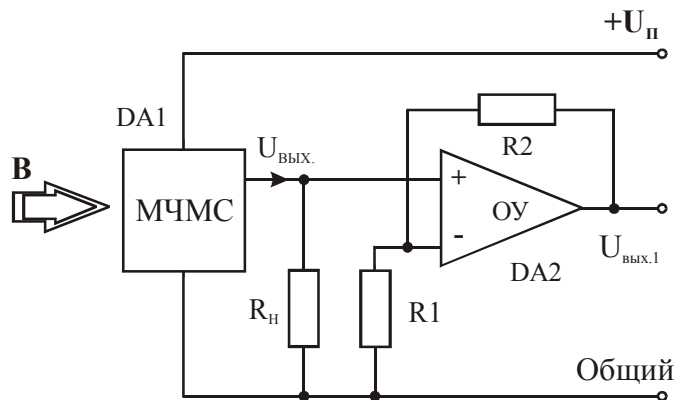


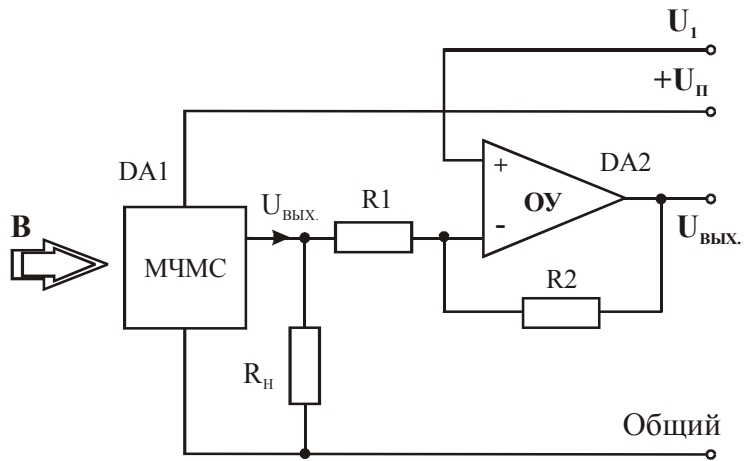
Рис. 3.17. Схема включения МЧМС с ОУ, работающим в режиме неинвертирующего усилителя

Напряжение на выходе $U_{ВЫХ.1}$ схемы (рис. 3.17) определяется по формуле:

$$U_{ВЫХ.1} = U_{ВЫХ} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) \quad (3.3)$$

где $U_{ВЫХ}$ – напряжение на выходе МЧМС.

Рис. 3.18. Схема включения МЧМС с ОУ, работающим в режиме инвертирующего усилителя



Напряжение на выходе ($U_{\text{ВЫХ.1}}$) схемы (рис. 3.18) определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ.1}} = (U_1 - U_{\text{ВЫХ.}}) \times \left(\frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \quad (3.4)$$

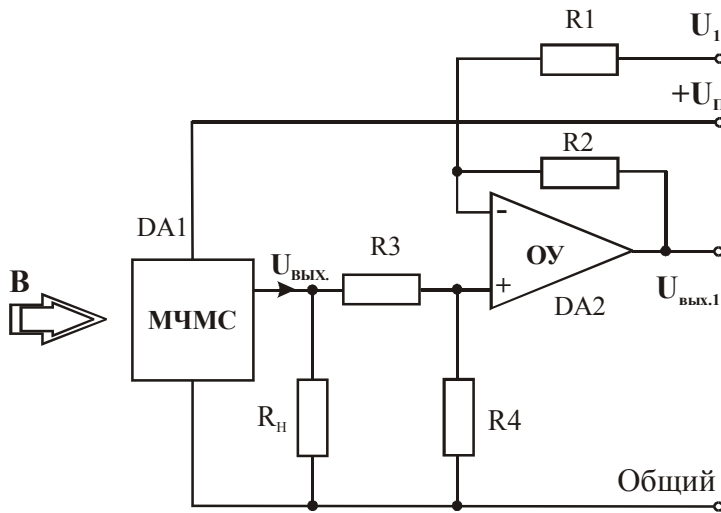


Рис. 3.19. Схема включения МЧМС с ОУ, работающим в режиме дифференциального усилителя

Напряжение на выходе $U_{\text{ВЫХ.1}}$ схемы (рис. 3.19) определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ.1}} = \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \times (U_{\text{ВЫХ.}} - U_1) \quad (3.5)$$

при $R_1 = R_3$ и $R_2 = R_4$.

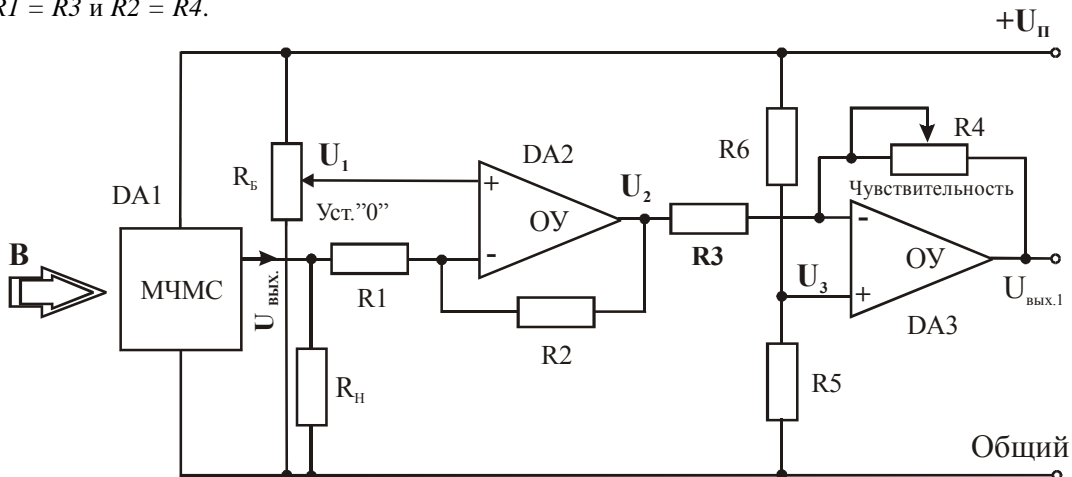


Рис. 3.20. Схема включения МЧМС с усилителем сигнала, выполненным на основе ОУ. В схеме предусмотрена регулировка чувствительности и установка 0

Напряжение на выходе усилителя $U_{\text{вых.1}}$ схемы (рис. 3.20) определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ.1}} = (U_3 - U_2) \times \left(\frac{R4}{R3} + U_3 \right) \quad (3.6)$$

где $U_2 = (U_1 - U_{\text{ВЫХ}}) \times \left(\frac{R2}{R1} + U_1 \right) \quad (3.7)$

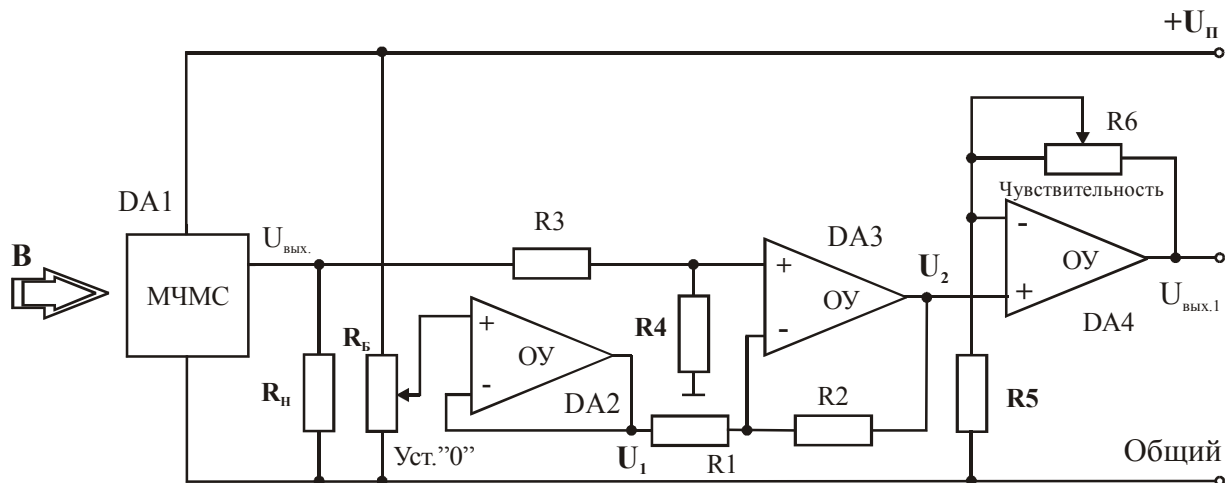


Рис. 3.21. Схема включения МЧМС с усилителем сигнала, выполненным на основе трех ОУ. В схеме предусмотрена регулировка чувствительности и установка 0.

Напряжение на выходе усилителя $U_{\text{вых.1}}$ схемы (рис. 3.21) определяется по формуле:

$$U_{\text{ВЫХ.1}} = (U_{\text{ВЫХ}} - U_1) \times \left(\frac{R6}{R5} + 1 \right) \quad (3.8)$$

при $R1 = R2 = R3 = R4$.

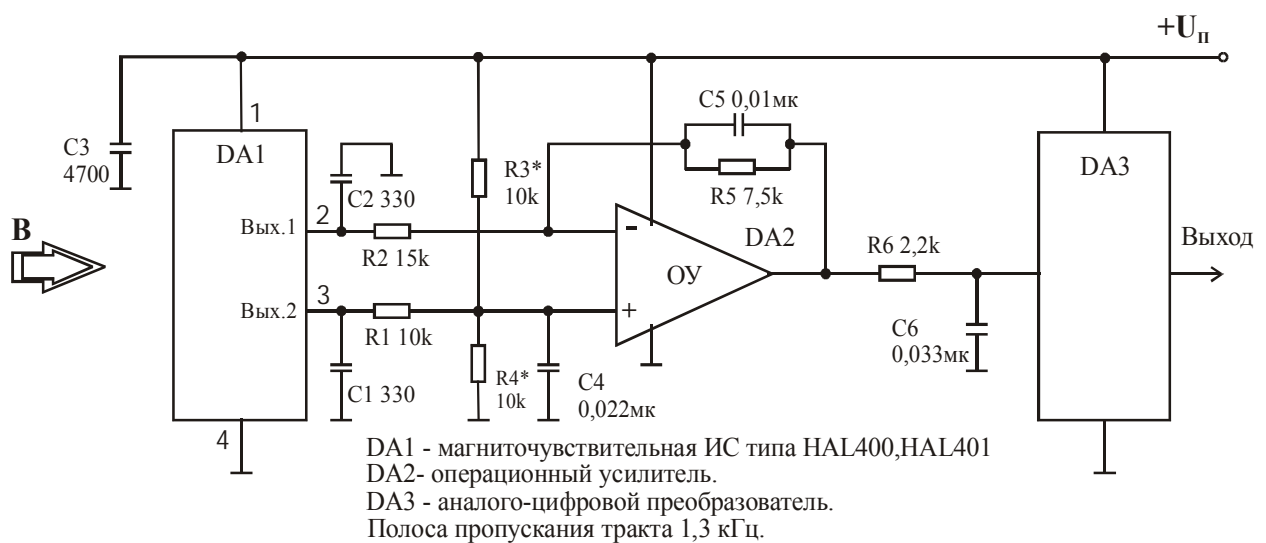
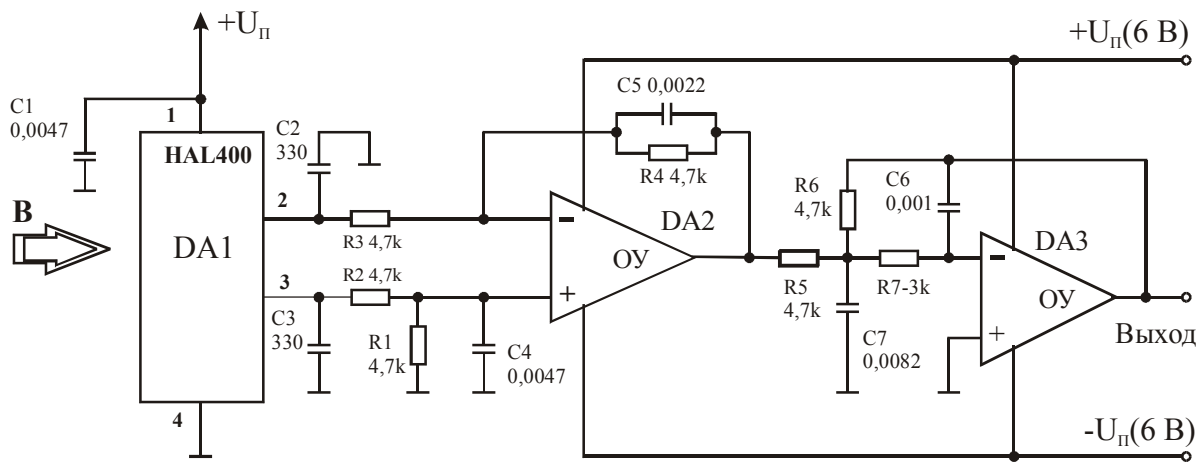


Рис. 3.22. Схема включения дифференциальной МЧМС серии HAL400 с усилителем сигнала, выполненным на основе ОУ



DA1 - магниточувствительная ИС типа HAL400, HAL401
DA2, DA3- операционные усилители.
Полоса пропускания тракта 14,7 кГц.

Рис. 3.23. Схема включения дифференциальной МЧМС серии HAL400 с усилителем сигнала, выполненным на основе двух ОУ

3.2. Магнитоуправляемые интегральные схемы

Магнитоуправляемые интегральные схемы (МУМ или МУМС) относятся к разряду цифровых интегральных схем. Эти схемы выполняют функцию электронных ключей, управляемых магнитным полем.

Функциональная схема простейшей магнитоуправляемой ИС приведена на рис. 3.24.

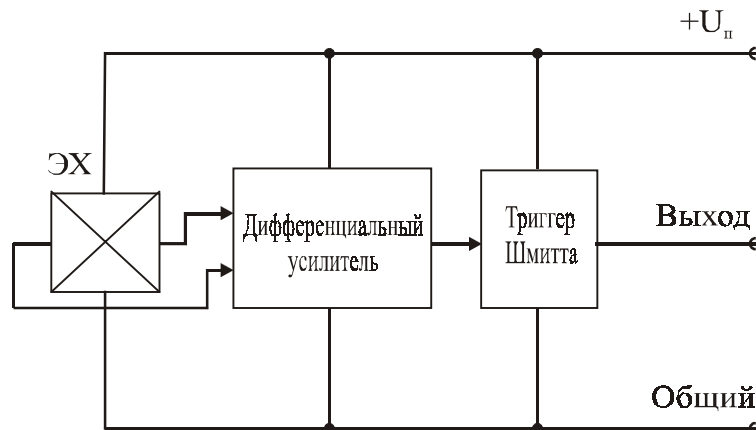


Рис. 3.24. Функциональная схема простейшей магнитоуправляемой ИС

В данном варианте магнитоуправляемой ИС в качестве преобразователя магнитного поля используется интегральный элемент Холла. Сигнал ЭХ усиливается дифференциальным усилителем, а затем поступает на вход порогового устройства (триггера Шмитта или компаратора). При воздействии управляющего магнитного поля определенной величины на выходе микросхемы появляется сигнал логической 1 или 0.

По реакции на воздействие внешнего магнитного поля микросхемы подразделяют на *униполярные*, уровень выходного напряжения которых зависит от величины индукции магнитного поля одной полярности, и *биполярные*, уровень выходного напряжения которых зависит как от величины индукции, так и от знака (полярности) воздействующего магнитного поля [3, 16].

Для магнитоуправляемых микросхем возможны два варианта характеристики переключения: *прямая* и *инверсная*. Характеристики переключения имеют уровень включено или выключено. Положению «Вкл» соответствует уровень $U_{\text{вых}}^0$, положению «Выкл» – уровень $U_{\text{вых}}^1$.

Характеристики переключения униполярных МУМ приведены на рис. 3.25.

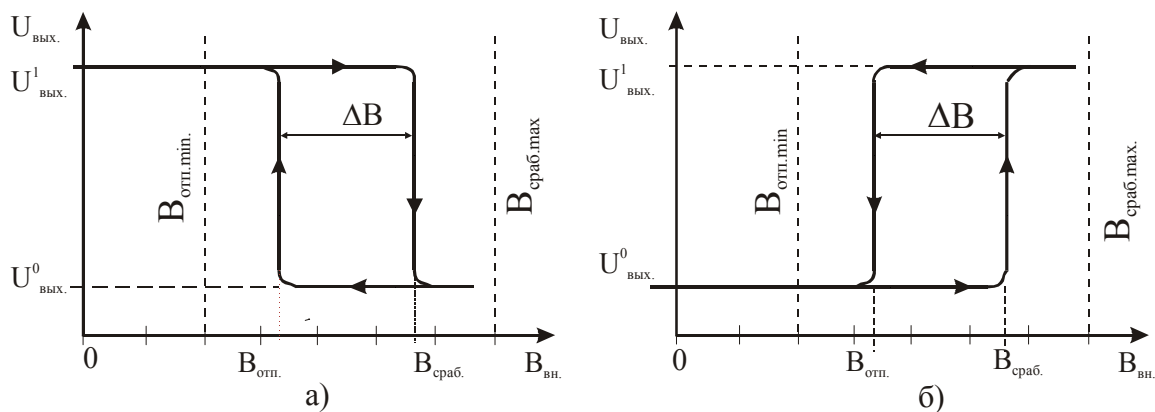


Рис. 3.25. Характеристики переключения униполярной магнитоуправляемой микросхемы: а – прямая; б – инверсная

В первом случае (рис. 3.25.а) в отсутствие управляющего магнитного поля сигнал на выходе микросхемы соответствует логической 1. При увеличении индукции управляющего магнитного поля до значения $B > B_{сраб}$ происходит переключение микросхемы и уровень сигнала на выходе скачком изменяется до логического 0. Дальнейшее увеличение индукции B не изменяет состояние схемы.

Во втором случае (рис. 3.25.б) в отсутствие управляющего магнитного поля сигнал на выходе микросхемы соответствует логическому 0. При увеличении индукции внешнего магнитного поля до значения $B > B_{сраб}$ происходит переключение микросхемы и уровень сигнала на выходе изменяется до логической 1. Дальнейшее увеличение индукции B не изменяет состояние схемы.

На рис. 3.26 приведена характеристика переключения биполярной магнитоуправляемой микросхемы.

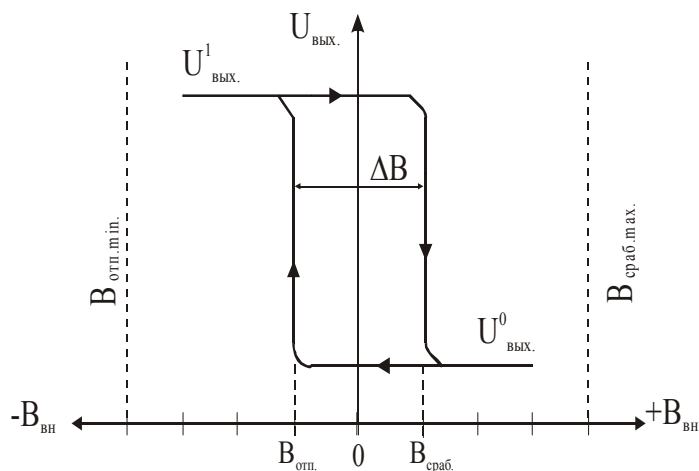


Рис. 3.26. Характеристика переключения биполярной магнитоуправляемой микросхемы

Состояние биполярной МУМ меняется при изменении полярности и величины индукции $B > B_{сраб}$ управляющего магнитного поля (рис. 3.26).

Иногда для изменения передаточной характеристики МУМ используют активные концентраторы магнитного поля, представляющие собой микроминиатюрные постоянные магниты, расположенные непосредственно на корпусе или на кристалле магнитоуправляемой микросхемы. Примером такой конструкции может служить МУМ типа UGN3035U, выпускаемая фирмой Sprague (см. главу 13, т. 2).

Характеристика переключения МУМ может смещаться в достаточно широких пределах если использовать концентратор в виде постоянного микромагнита.

Направление и величина смещения зависят от полярности и величины индукции постоянного магнита. Характеристика переключения МУМ с активным концентратором магнитного поля в виде встроенного микромагнита приведена на рис. 3.27.

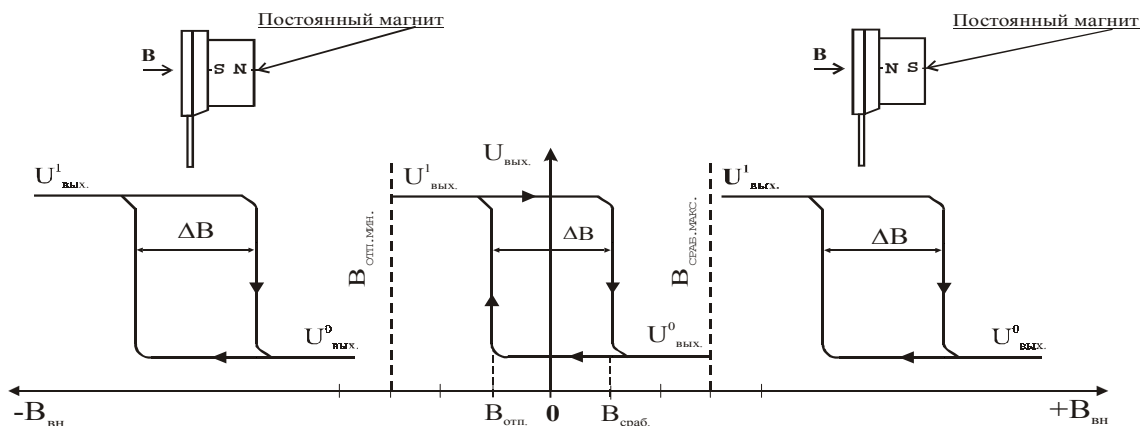


Рис. 3.27. Характеристика переключения МУМ с активным концентратором магнитного поля в виде встроенного микромагнита

Примечание. В зарубежной научно-технической литературе биполярные МУМ часто обозначают термином *LATCH* – ЗАЩЕЛКА. Такой прибор изменяет свое состояние (Вкл/Выкл), если величина индукции управляющего магнитного поля любой полярности (север или юг) превышает значение $B_{ср\text{аб}}$.

Кроме того, зарубежными фирмами используется и термин *SWITCH* – ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ – униполярный или биполярный прибор, который реагирует на изменение полярности управляющего магнитного поля, когда величина индукции этого поля превышает значение $B_{ср\text{аб}}$.

При воздействии на МУМ модулированного магнитного потока (например, импульсами прямоугольной формы) сигнал на выходе будет иметь несколько искаженную форму. Эти искажения связаны с инерционностью микросхемы – временем включения/выключения. Переходная характеристика МУМ приведена на рис. 3.28.

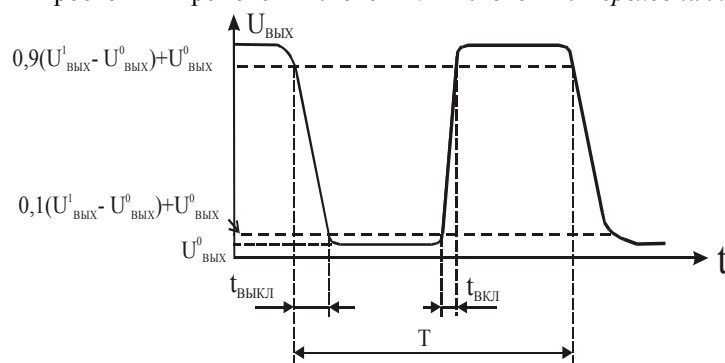


Рис. 3.28. Переходная характеристика МУМ

Время срабатывания (включения) $t_{\text{ВКЛ}}$, как правило, в 1,5–2 раза меньше времени отпускания (выключения) $t_{\text{ВЫКЛ}}$.

На рис. 3.29а–и приведены наиболее распространенные функциональные схемы МУМ. Эти схемы не требуют особых пояснений.

Для более сложных магнитоуправляемых микросхем применяются другие функциональные схемы, содержащие иные элементы.

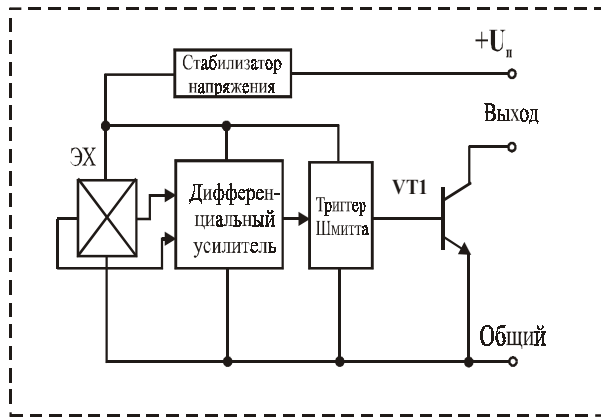
По результатам разработки и выпуска магнитоуправляемых микросхем сложилась определенная их классификация по уровню основных параметров, но из-за отсутствия нормативной базы последняя носит почти эмпирический характер. Примерная классификация магнитоуправляемых микросхем приведена в табл. 3.8 и 3.9.

Таблица 3.8. Примерная классификация униполярных магнитоуправляемых микросхем

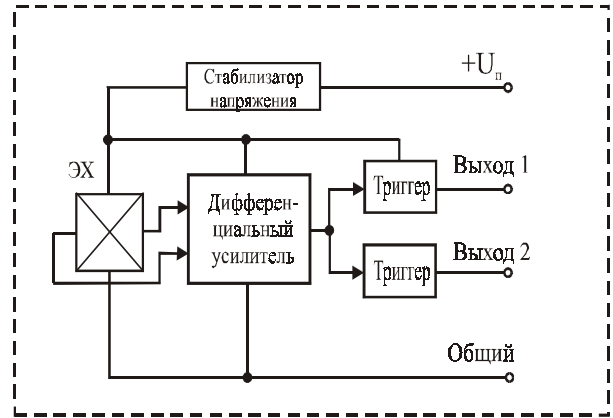
Основные параметры микросхем	Условная группа микросхем		
	Микроомощные	Маломощные	Мощные
Напряжение питания, В	от 2,0 до 5,5	от 2,5 до 30	от 4,5 до 50
Ток потребления, мА, не более	1	10	20
Ток коммутации, мА, не более	до 10	от 30 до 50	от 50 до 2500
Индукция срабатывания, мТл	3...70	5...70	10...100
Для ультрачувствительных, мТл	0,5...5	0,5...5	0,5...5
Индукция отпускания, мТл	1...60	3...50	5...80
Для ультрачувствительных, мТл	0...1,0	0...1,0	0...2
Гистерезис, мТл	0,5...5	0,5...10	2...20
Время срабатывания/отпускания, нс	20...500	40...500	500...5000
Выходное напряжение низкого уровня, В	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Выходное напряжение высокого уровня, В	> 2,4	> 2,4	> 2,4
Выходной ток низкого уровня, мкА	0,05...10	0,5...10	1...100
Диапазон рабочих температур, °С	-10...+85	-60...+125	-65...+125
	-40...+170	-40...+170	-40...+150

Таблица 3.9. Примерная классификация биполярных магнитоуправляемых микросхем

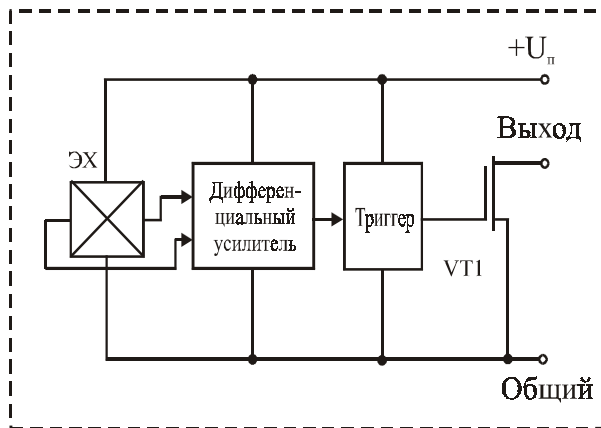
Основные параметры микросхем	Условная группа микросхем		
	Микроомощные	Маломощные	Мощные
Напряжение питания, В	от 2,0 до 5,5	от 2,5 до 30	от 4,5 до 50
Ток потребления, мА, не более	1	10	20
Ток коммутации, мА, не более	до 10	от 30 от 50	от 50 от 2500
Индукция срабатывания, мТл	3...70	5...70	10...100
Для ультрачувствительных, мТл	0,5...5	0,5...5	0,5...5
Индукция отпускания, мТл	-(1...60)	-(3...50)	-(5...80)
Для ультрачувствительных, мТл	-(0,1...1,0)	-(0,1...1,0)	-(0,2...2)
Гистерезис, мТл	0,5...5	0,5...10	2...20
Время срабатывания/отпускания, нс	20...500	40...500	500...5000
Выходное напряжение низкого уровня, В	< 0,4	< 0,4	< 0,4
Выходное напряжение высокого уровня, В	> 2,4	> 2,4	> 2,4
Выходной ток низкого уровня, мкА	0,05...10	0,5...10	1...100
Диапазон рабочих температур, °С	-10...+85	-60...+125	-65...+125
	-40...+170	-40...+170	-40...+150



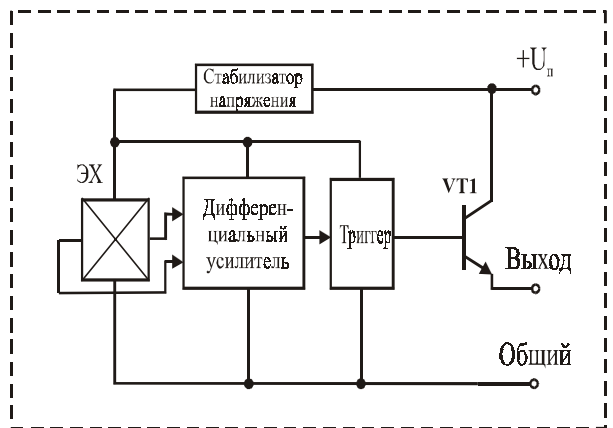
а)



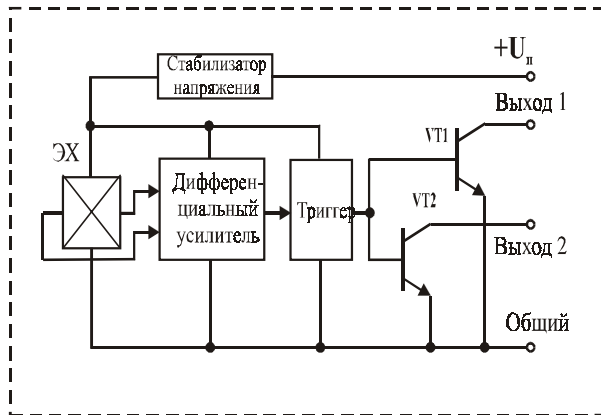
б)



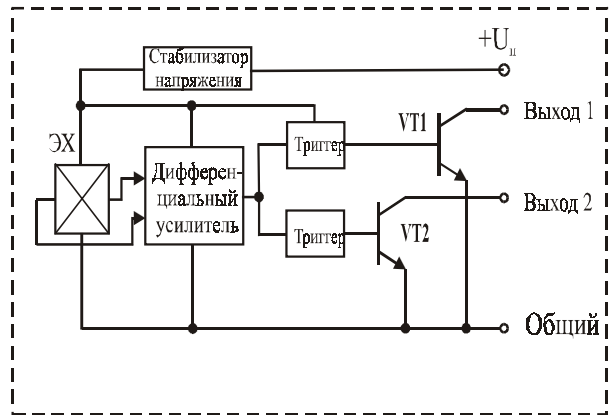
в)



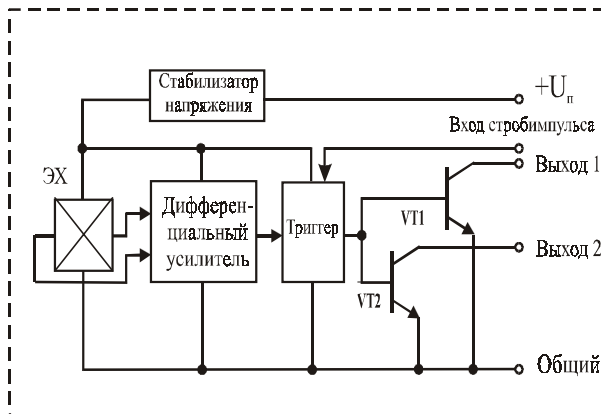
г)



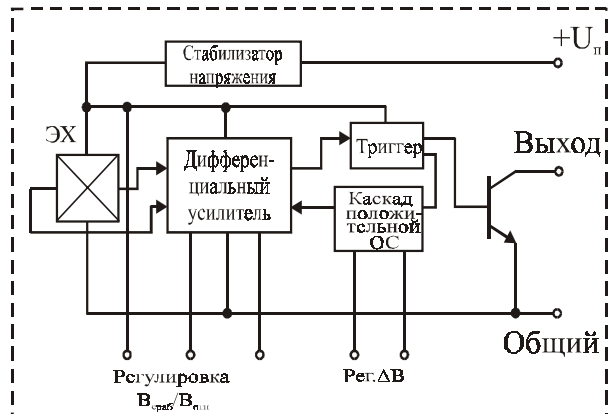
д)



е)



ж)



з)

Рис. 3.29. Функциональные схемы наиболее распространенных МУМ

3.2.1. Электрические схемы магнитоуправляемых ИС

Принципиальные электрические схемы магнитоуправляемых ИС отличаются большим разнообразием и определяются основными параметрами, предъявляемыми к МУМ, и технологией их изготовления. Ниже приводятся, практически без объяснений, несколько примеров схмотехнической реализации МУМ.

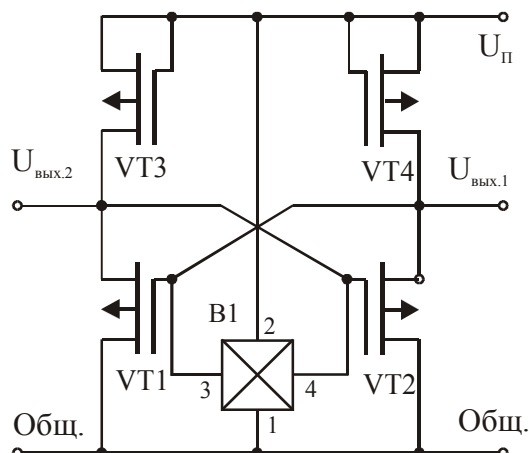


Рис. 3.30. Электрическая схема простейшей магнитоуправляемой КМОП ИС

На рис. 3.30 приведена электрическая схема простейшей магнитоуправляемой ИС. Схема состоит из интегрального элемента Холла B1, используемого в качестве ПМП, и симметричного триггера с непосредственной связью, используемого в качестве схемы управления, включающей четыре КМОП транзистора. При этом транзисторы VT3 и VT4 являются динамической нагрузкой транзисторов VT1 и VT2 [23].

Схема (рис. 3.30) работает следующим образом. В исходном состоянии транзистор VT1 открыт, а транзистор VT2 закрыт. На выходе $U_{\text{вых.2}}$ имеется потенциал (сигнал) высокого уровня, а на выходе $U_{\text{вых.1}}$ – потенциал низкого уровня. Через контакты 1 и 2 элемента Холла B1 протекает электрический ток (ток утечки, иногда называемый током ожидания). Потенциал на контактах 3 и 4 элемента Холла отсутствует.

При воздействии управляющего магнитного поля на контактах 3, 4 возникает ЭДС Холла, которая изменяет потенциал на затворе транзистора VT1. При индукции управляющего магнитного поля с $B > B_{\text{сраб}}$ транзистор VT1 закрывается, вследствие чего открывается транзистор VT2 и изменяется сигнал на выходе $U_{\text{вых.1}}$.

При уменьшении индукции управляющего магнитного поля до $B < B_{\text{сраб}}$ транзистор VT1 открывается, транзистор VT2 закрывается и сигнал на выходе $U_{\text{вых.1}}$ смещается до первоначального значения.

На рис. 3.31–3.34 приведены принципиальные электрические схемы магнитоуправляемых ИС, реализованных с использованием эппланарной технологии.

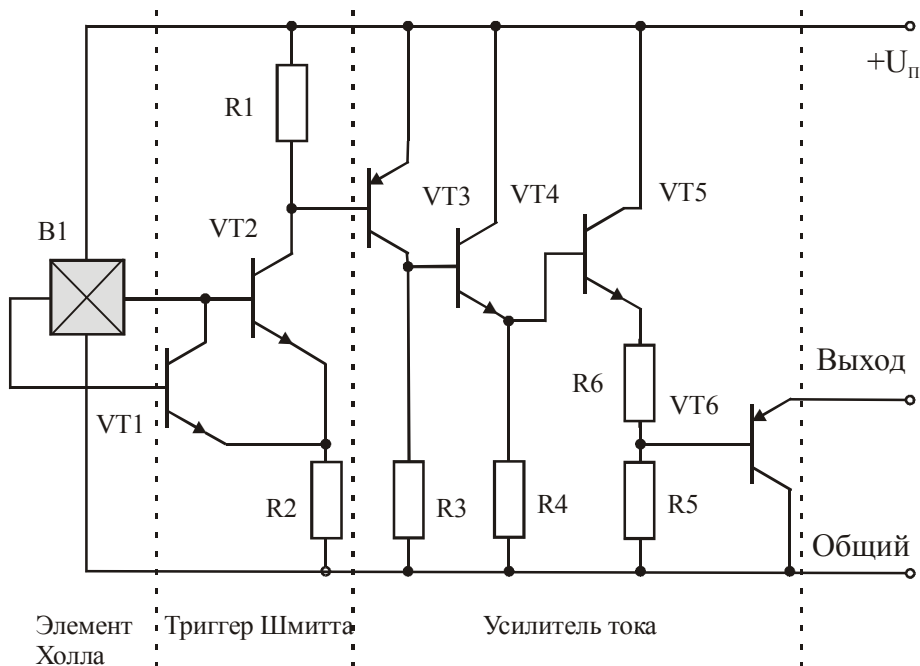


Рис. 3.31. Электрическая схема магнитоуправляемой ИС, изготовленной по эппланарной технологии. В качестве преобразователя магнитного поля используется один интегральный элемент Холла [46]

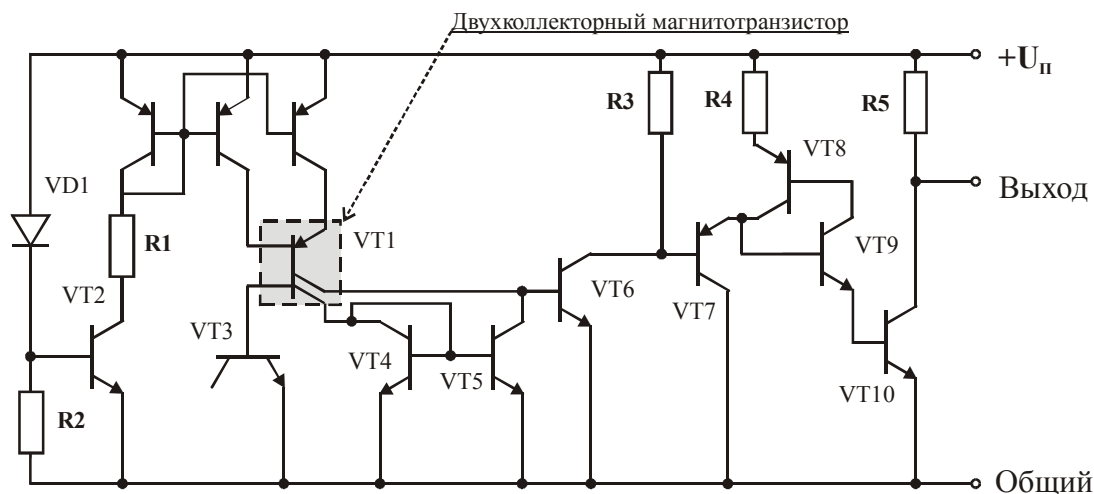


Рис. 3.32. Электрическая схема магнитоуправляемой ИС, изготовленной по эпитланарной технологии. В качестве преобразователя магнитного поля используется один интегральный двухколлекторный магнитотранзистор

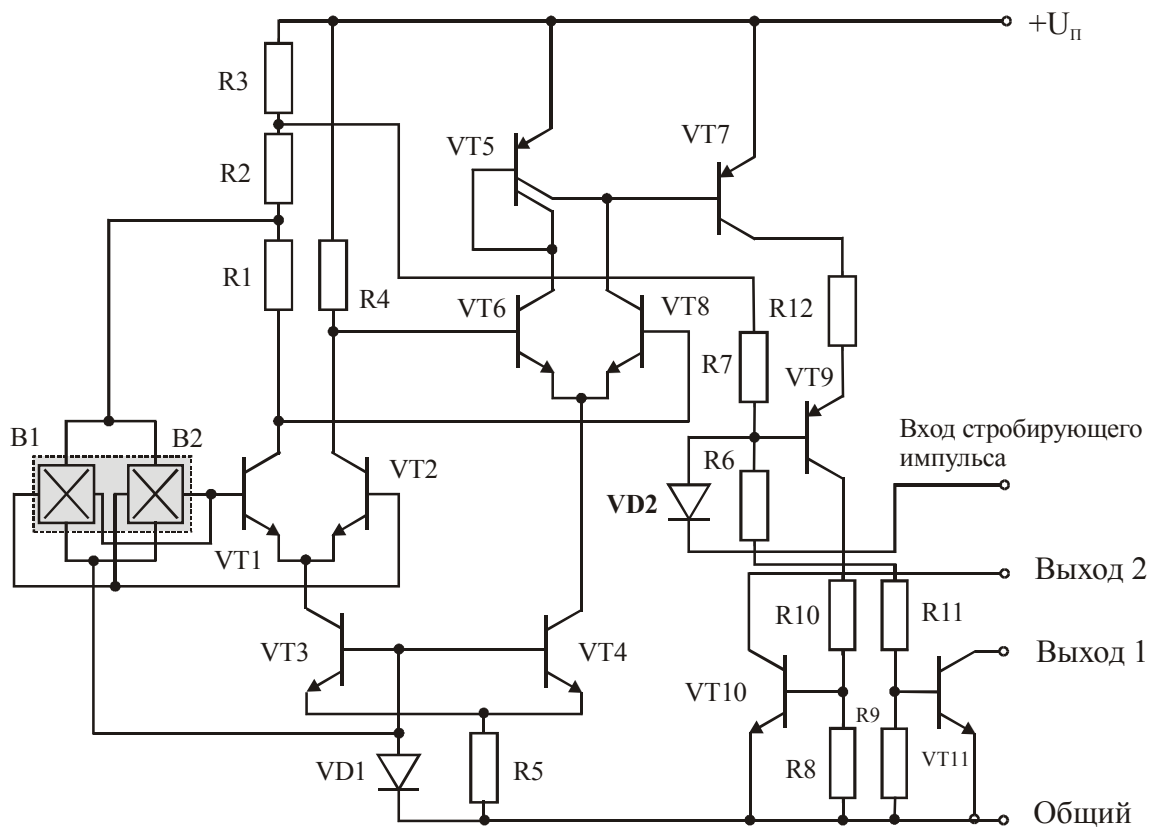


Рис. 3.33. Электрическая схема магнитоуправляемой ИС, изготовленной по эпитланарной технологии. В качестве преобразователей магнитного поля используются два интегральных элемента Холла, включенных встречно-параллельно

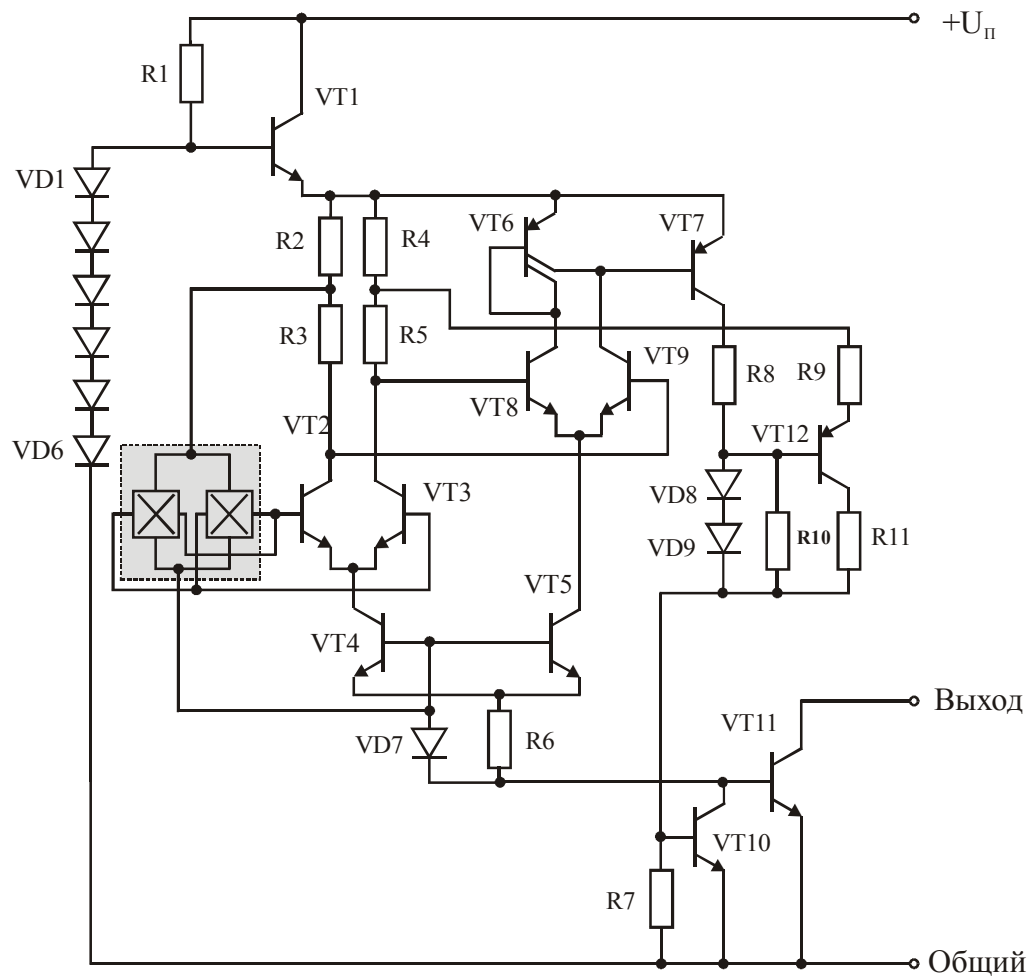


Рис. 3.34. Электрическая схема магнитоуправляемой ИС, изготовленной по эпитланарной технологии. В качестве преобразователей магнитного поля используются два интегральных элемента Холла, включенных встречно-параллельно. Диоды VD1–VD6 применяются в качестве опорного источника стабилизатора напряжения VT1

3.2.2. Промышленные образцы отечественных МУМ

Разработкой магнитоуправляемых и магниточувствительных схем в Советском Союзе и СНГ занимались до 1992 года несколько организаций, в числе которых ОКБ ПО «Гиперон» (г. Москва), СКТБОП ИФТТП АН БССР (г. Минск), НИИ ГИРИКОНД, НПК «Электроприбор», ЛНПО «Электронмаш» (г. Ленинград), НПО космических исследований (г. Баку), производственное объединение «Позистор» (г. Ереван), СКБ завода «Азон» (г. Баку), СКТБ МЭПО «Вега» (г. Бердск), НПК УМЦ (г. Самара), ЛНИРТИ (г. Львов), НПК «Технологический центр» (г. Зеленоград), МП «Инсеп» (г. Ленинград), НПО «Физика» (г. Москва), СКБ ПО «Элькор» (г. Нальчик) и некоторые др.

Специалистами этих организаций были разработаны и изготовлены на уровне экспериментальных и опытных образцов цифровые и аналоговые магнитоуправляемые и магниточувствительные микросхемы в различных вариантах конструктивного и технологического исполнения.

Основным производителем кремниевых магнитоуправляемых ИС в СССР являлся Первый московский завод радиодеталей (ПО «Гиперон»), который выпускал серию К1116КП маломощных МУМ, состоящую из 14 типов изделий с очень близким уровнем параметров. Годовой объем выпуска девяти типов ИС указанной серии составлял примерно 2,0 млн. шт. при потенциальных возможностях завода более 5 млн. шт.

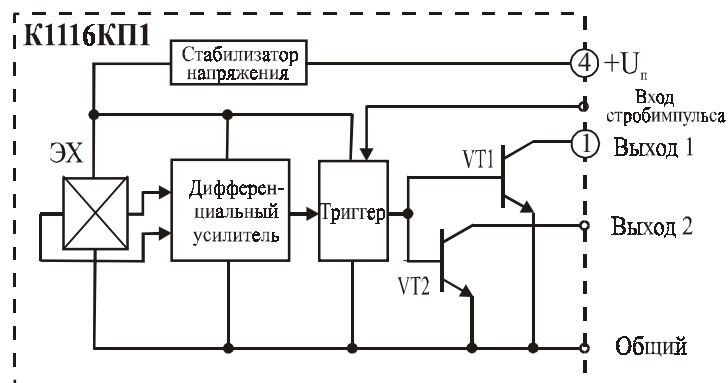
В 1999 году АО «Ангстрем» [13] начал выпуск магнитоуправляемых ИС типа КФ5116КП1 и КФ5116КП3. Схемы предназначены для использования в качестве датчиков угла поворота ротора бесколлекторных электродвигателей постоянного тока. Имеются сообщения о начале выпуска КО «Кристалл» на Украине магнитоуправляемых ИС типа UA01ХП29, UA01ХП39, UA01ХП49 [14]. Основные параметры микросхем приводятся в главе 13 тома 2.

Магнитоуправляемые микросхемы серии К1116КП

Основные характеристики магнитоуправляемых ИС серии К1116КП даны в главе 13 [3, 16, 17]. Ниже будут рассмотрены некоторые особенности микросхем серии К1116КП.

На рис. 3.35 показана функциональная схема МУМ типа К1116КП1, К1116КП2 и 1116КП6.

Рис. 3.35. Функциональная схема МУМ типа К1116КП1, К1116КП2 и 1116КП6



Магнитоуправляемые ИС типа К1116КП1, К1116КП2 и 1116КП6 предназначены для использования в составе бесконтактных клавишных модулей. Они имеют по два синфазных выхода с открытым коллектором и стробирующий вход (вывод 3). При подаче на этот вход стробирующего импульса с уровнем логического 0 уровень выходного напряжения не будет зависеть от воздействия внешнего магнитного поля, так как будет реализована функция «запрет».

Если вход стробирования не используют, его необходимо подключить к плюсовому проводу цепи питания. Использование стробирующего входа позволяет значительно снизить энергопотребление ИС, что особенно актуально при функционировании многоклавишной клавиатуры.

Микросхемы К1116КП1, К1116КП2 и 1116КП6 являются униполярными приборами.

Микросхемы К1116КП1 и 1116КП6 имеют прямой выход, сигнал на котором в отсутствие магнитного поля соответствует уровню логической 1 (рис. 3.36.а). При увеличении индукции внешнего магнитного поля до значения $B > B_{сраб}$ происходит переключение микросхемы и уровень сигнала на выходе скачком изменяется до логического 0 (рис. 3.36.б).

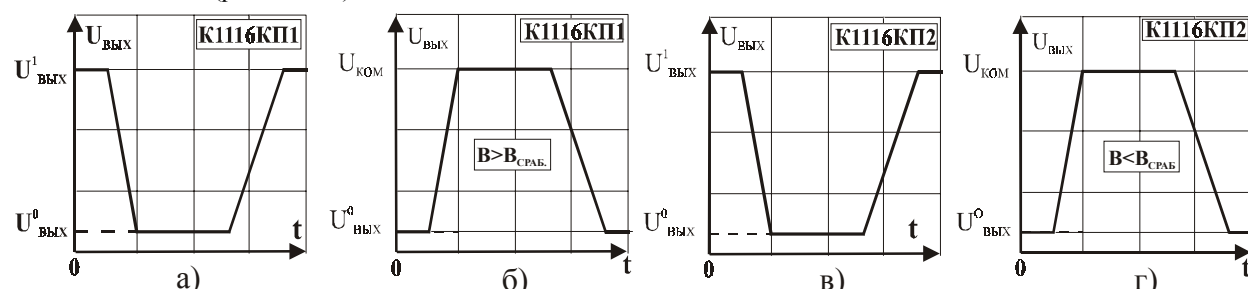


Рис. 3.36. Характеристики переключения МУМ типа а, б – К1116КП1; в, г – К1116КП2

Микросхема К1116КП2 имеет инверсный выход, на котором уровень логической 1 появляется при воздействии магнитного поля с индукцией $B < B_{сраб}$ (см. рис. 3.36в,г). При использовании микросхем типа К1116КП1, К1116КП2 и 1116КП6 допускается объединение их выходов при условии, что общий ток нагрузки не будет превышать 50 мА.

Микросхемы типа К1116КП3, К1116КП5, 1116КП6, К1116КП9, К1116КП10 являются униполярными. Они имеют по одному выходу и не имеют входа для подачи стробирующего импульса.

Микросхемы К1116КП4, К1116КП7, К1116КП8, К1116КП11, К1116КП12-2, К1116КП13 и К1116КП14 являются биполярными приборами и изменяют свое состояние при изменении полярности и величины индукции управляющего магнитного поля. Эти микросхемы тоже имеют по одному выходу и не имеют входа для подачи стробирующего импульса.

Микросхема К1116КП4 имеет встроенный резистор нагрузки сопротивлением порядка 30 кОм, включенный между выходом и плюсовым проводом источника питания.

Микросхемы серии К1116КП реализованы в четырех вариантах конструктивного исполнения – трех- и пятивыводные стандартные пластмассовые корпуса с шагом расположения выводов 2,5 и 1,25 мм (рис. 3.37 и 3.38).

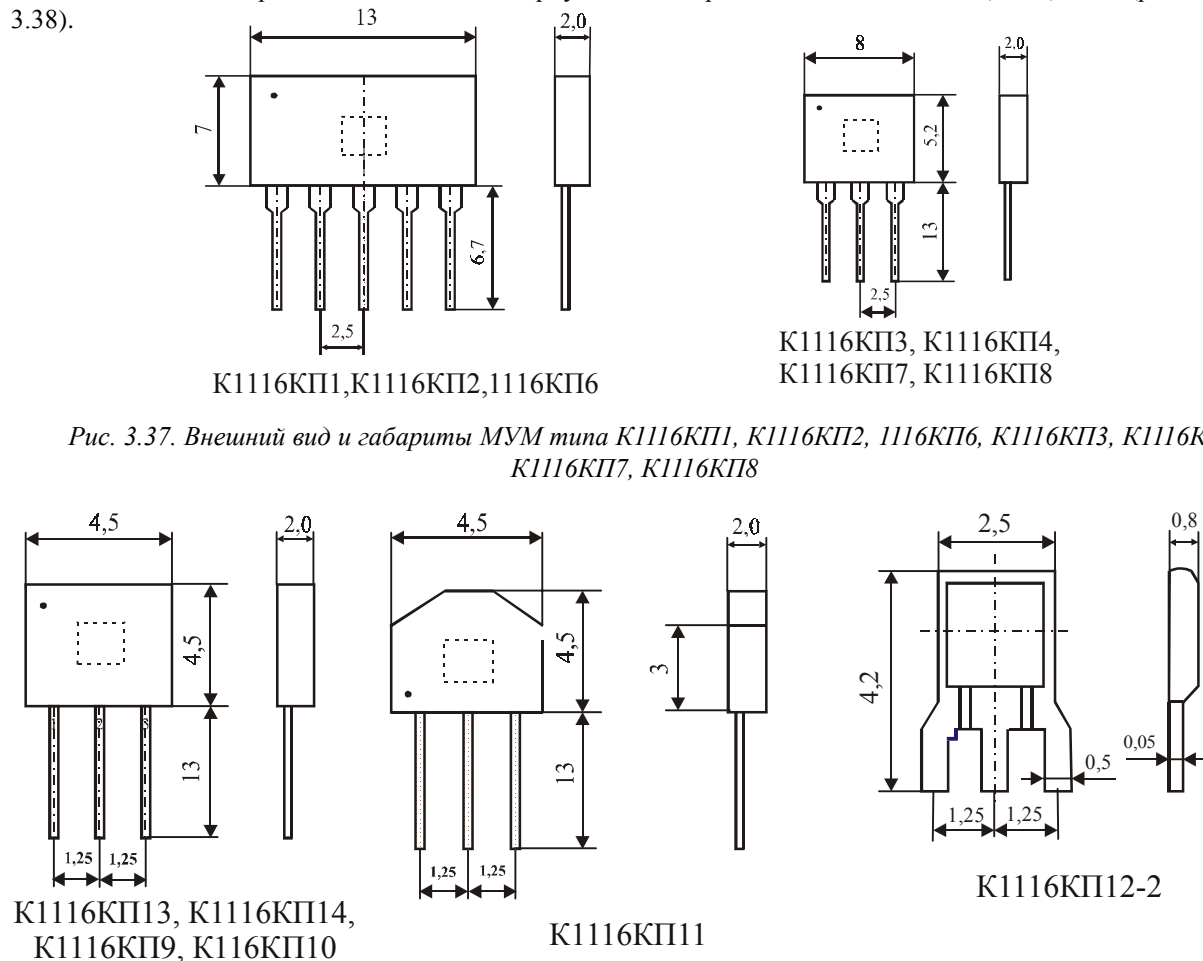


Рис. 3.37. Внешний вид и габариты МУМ типа К1116КП1, К1116КП2, 1116КП6, К1116КП3, К1116КП4, К1116КП7, К1116КП8

Рис. 3.38. Внешний вид и габариты МУМ типа К1116КП9, К1116КП10, К1116КП11, К1116КП13, К1116КП14, К1116КП12-2

Микросхема К1116КП12-2 выпускается в бескорпусном исполнении. Все микросхемы серии К1116КП изготовлены с использованием типовой эпитланарной технологии. Нарботка микросхем серии К1116КП составляет 50 тыс. ч.

Микросхемы могут нормально функционировать при воздействии синусоидальной вибрации с частотой 0–5000 Гц с ускорением до 40 g, одиночных ударов с ускорением до 1500 g и линейного ускорения до 2000 g.

Диапазон рабочих температур от –60 до +125 °С – в зависимости от типа МУМ. Допустимая влажность окружающего воздуха – не более 98% при температуре до 35 °С.

Микросхемы пригодны для монтажа в аппаратуре как методом групповой пайки, так и паяльником. Температура пайки – не более 265 °С, время пайки – не более 4 с. При использовании микросхем в условиях высокой влажности воздуха и для повышения надежности работы рекомендуется трехслойное покрытие корпуса МУМ лаком УР-231.

Основные параметры микросхем серии К1116КП приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10. Основные параметры магнитоуправляемых ИС серии К1116КП

№ п/п	Тип микросхемы	Напряжение питания $U_{п}, В$	Ток потребления $I_{п}, мА$	Ток коммутации $I_{ком.макс}, мА$	Индукция срабатывания $B_{сраб.}, мТл$	Индукция отпускания $B_{отп.}, мТл$	Характеристика переключения	Время включения $t_{вкл.}, нс$
1	К1116КП1	4,5...5,5	5	25 x 2	80	20	Униполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	250
2	К1116КП2	4,5...5,5	5	25 x 2	25	110	Униполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	500
3	К1116КП3	6...16	13	25	55	10	Униполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	200
4	К1116КП3	6...12	13	25	55	10	Униполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	200
5	К1116КП4	6...12	7,5	25	30	-30	Биполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	1000
6	К1116КП6	4,5...29	3	30x2	80	20	Униполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	200
7	К1116КП7	20...35	9	25	25	-30	Биполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	500
8	К1116КП8	4,5...5,5	9	25	25	-30	Биполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	500
9	К1116КП9	4,5...5,5	10	20	35	10	Униполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	250
9	К1116КП10	4,5...5,5	6	20	40	10	Униполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	500
10	К1116КП11	5...12	6	25	13	-13	Биполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	250
11	К1116КП12-2	5...12	6	25	30	-30	Биполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	500
12	К1116КП13	4,5...12	6	20	15	-15	Биполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	500
13	К1116КП14	4,5...5,6	5	20	30	-30	Биполярная ($\Delta B=5...9$ мТл) (ОтК)	100

По уровню основных параметров микросхемы серии К1116КП не уступают своим зарубежным аналогам. Магнитоуправляемые микросхемы серии К1116КП имеют выходной каскад с «открытым коллектором». Они рассчитаны на сопряжение с цифровыми интегральными микросхемами типа РТЛ, ДТЛ, ТТЛ, И²Л и с КМОП логикой. Пример сопряжения микросхем указанной серии со стандартной логикой приведен на рис. 3.39.

Минимальное сопротивление $R1$ определяется по формуле:

$$R1_{\min} > \frac{U_{\text{ком}}}{I_{\text{вых. макс}}^0}, \text{ Ом} \quad (3.8)$$

где $U_{\text{ком}}$ – напряжение коммутации, В;
 $I_{\text{вых. макс}}^0$ – максимальный выходной ток низкого уровня, А.

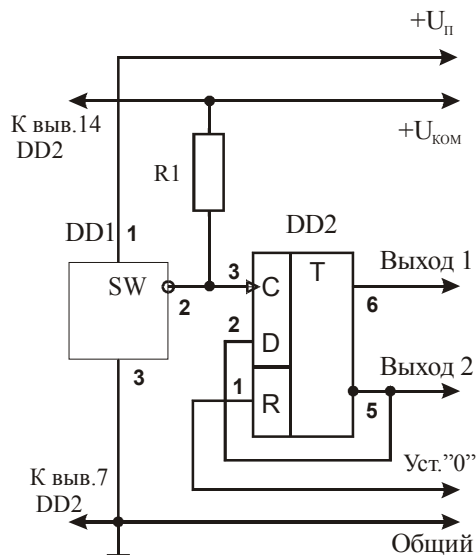


Рис. 3.39. Пример схемы сопряжения МУМ серии K1116KP с TTL логикой

DD1- магнитоуправляемая ИС K1116KP4
DD2- микросхема K155TM2

Другие образцы отечественных магнитоуправляемых микросхем

Из схем, разработанных другими производителями в СССР, интерес представляет униполярная МУМ типа ПМП, разработанная в НПО КИ (г. Баку). Функциональная схема МУМ ПМП приведена на рис. 3.40. В микросхеме предусмотрена регулировка индукции срабатывания/отпускания и гистерезиса путем использования внешних резисторов. Основные параметры МУМ приведены в табл. 3.11 [1, 2].

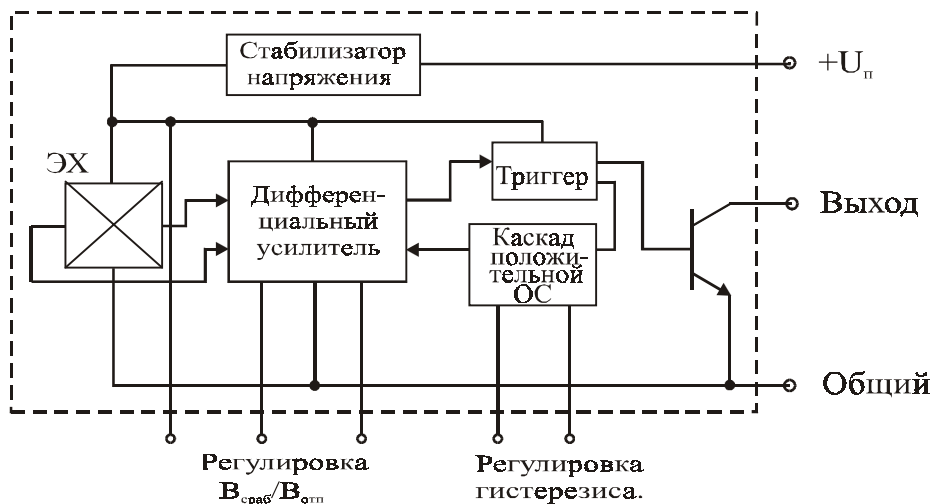


Рис. 3.40. Функциональная схема МУМ типа ПМП

Таблица 3.11. Основные параметры МУМ типа ПМП

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	9...27
2	Ток потребления, мА	6
3	Ток коммутации, мА, не более	12
4	Индукция срабатывания, мТл	5...50 (регулируется)
5	Индукция отпускания, мТл	5 (регулируется)
6	Время включения, мкс	1
7	Время выключения, мкс	2
8	Диапазон рабочих температур, °C	-60...+125
9	Габаритные размеры, мм	7 x 13 x 2

Представляет интерес кремниевая МУМ типа ИМС К1, разработанная малым предприятием «ИНСЕП» (г. Ленинград), функциональная схема которой приведена на рис. 3.41. Схема изготовлена с применением КМОП технологии. В качестве преобразователя магнитного поля использован биполярный магнитотранзистор с планарной магнитной осью. В схеме предусмотрено цифровое управление индукцией срабатывания. Основные параметры микросхемы приведены в табл. 3.12 [6, 7].

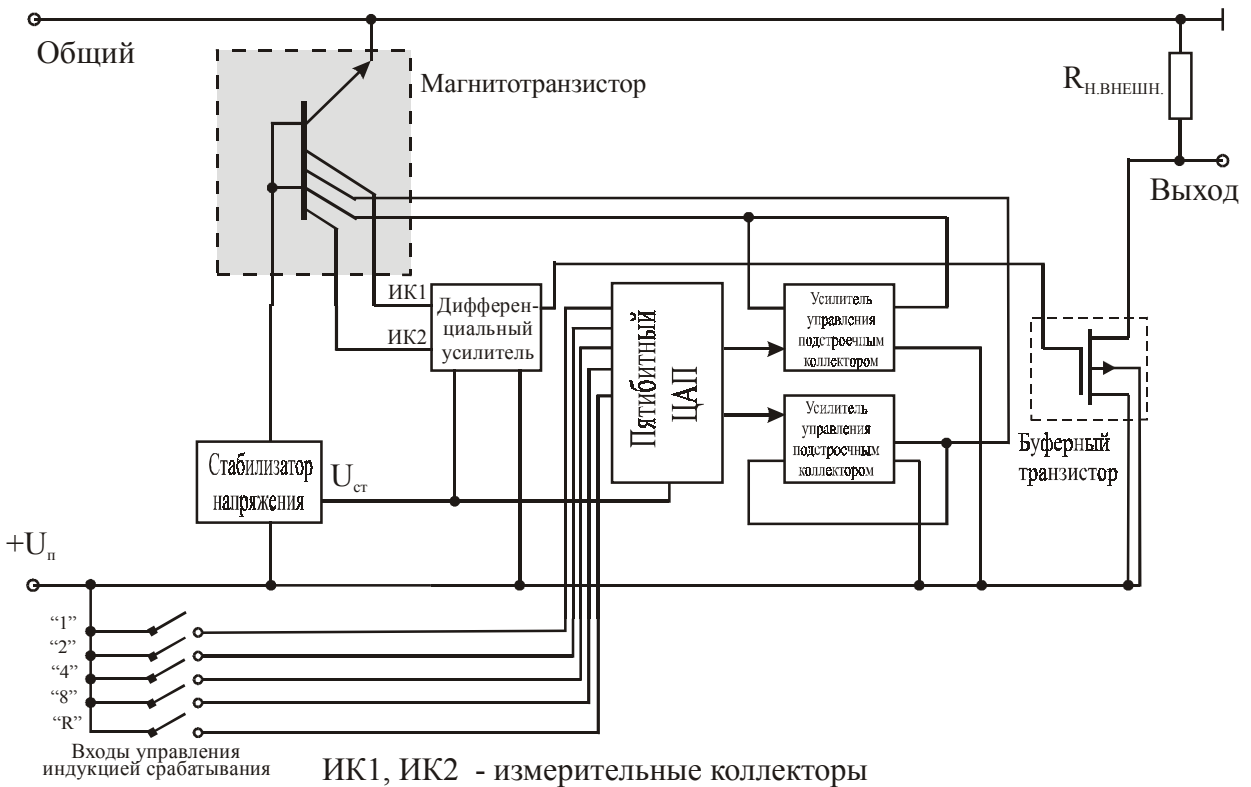


Рис. 3.41. Функциональная схема МУМ типа ИМС К1

Таблица 3.12. Основные параметры МУМ типа ИМС К1

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 6 до 12
2	Ток потребления, мА	1
3	Ток коммутации, мА, не более	5
4	Напряжение коммутации, В	1,5...12
5	Индукция срабатывания, мТл	от -15 до +15 (Программируется с шагом 1 мТл)
6	Гистерезис, мТл	0,4...1,0
7	Время включения, мкс	<1
8	Время выключения, мкс	<1
9	Диапазон рабочих температур, °С	-60...+100

3.2.3. Промышленные образцы зарубежных МУМ

Из зарубежных источников известно, что разработкой и производством магнитоуправляемых схем занимаются свыше ста фирм, которые выпускают более сотни типов магнитоуправляемых микросхем. По косвенной оценке суммарный годовой объем их производства достигает миллиарда штук.

Ведущими производителями являются фирмы: Sprague Electric Co., Allegro MicroSystem (США), Honeywell, Micronas Intermetall, Melexis, Siemens, Ebeco (Германия), Matsu-shita Elec. Corp., Sharp, Densi (Япония), Texas Instruments (США) и др.

В США и Европе указанные ИС изготавливаются на основе кремния, в Японии, кроме кремния, используются арсенид галлия и антимонид индия. Зарубежными производителями ИС используются все современные технологические процессы микроэлектроники, в том числе эпитланарная, КМОП, гибриднопленочная и др.

Зарубежные фирмы выпускают магнитоуправляемые микросхемы практически всех известных классов (см. табл. 3.8 и 3.9).

Основные обобщенные параметры зарубежных магнитоуправляемых микросхем приведены в табл. 3.13.

Таблица 3.13. Основные обобщенные параметры зарубежных магнитоуправляемых микросхем

№ п/п	Наименование параметра, ед. измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	От 4,5 до 50
2	Ток потребления для маломощных, мА	От 2,0 до 9,0
3	Ток коммутации для маломощных, мА	От 10 до 50
4	Ток потребления для мощных, мА	От 10 до 20
5	Ток коммутации для мощных, мА	От 250 до 2500
6	Диапазон индукций срабатывания/отпускания, нс	От 1 до 200
7	Время включения/выключения, нс	От 40 до 10000
8	Диапазон рабочих температур, °С	-60...+170

Конструктивное оформление магнитоуправляемых и магниточувствительных микросхем, выпускаемых зарубежными фирмами, весьма разнообразно. Фирмы используют более 50 вариантов корпусирования магнитоуправляемых микросхем. Микросхемы выпускаются в стандартных (SIP, DIP, SO, SOIC, SOT-89, SO-14, SOZ-20, TO-226AA, TO-243AA, Minipack, Micropack и др.), а также в оригинальных пластмассовых и металлокерамических корпусах; а также в корпусах, предназначенных для автоматизированной установки на поверхность печатных плат и в бескорпусном исполнении.

По требованию заказчика микросхемы могут быть поставлены в любой упаковке или непосредственно на кремниевой пластине. На рис. 3.42 показан внешний вид нескольких вариантов корпусов МУМ.

Функциональные схемы большинства зарубежных МУМ соответствуют вариантам на рис. 3.29.а–з и предназначаются для универсального применения. Однако фирмами выпускается широкая номенклатура магнитоуправляемых ИС, предназначенных для конкретного применения. Такие МУМ, как правило, имеют достаточно сложную схемотехнику и содержат специфические электронные узлы. Основные характеристики наиболее известных МУМ, выпускаемых зарубежными фирмами, даны в главе 13 тома 2.

Далее рассмотрим отдельные варианты функциональных схем специализированных МУМ, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами.

Магнитоуправляемые ИС типа UGN3132 и UGN3133

Магнитоуправляемые ИС типа UGN3132 и UGN3133, выпускаемые фирмой Allegro, относятся к ультрочувствительным МУМ, которые отличаются низкими значениями индукции срабатывания/отпускания (менее 5 мТл).

На рис. 3.43 приведена упрощенная функциональная схема МУМ типа UGN3132 и UGN3133.

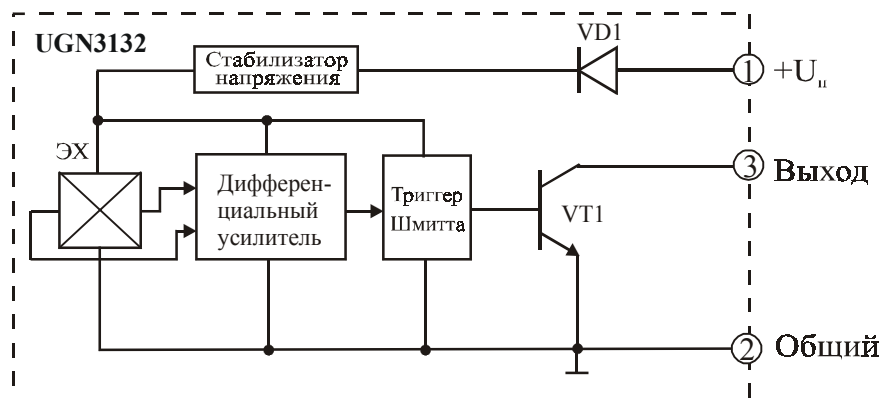
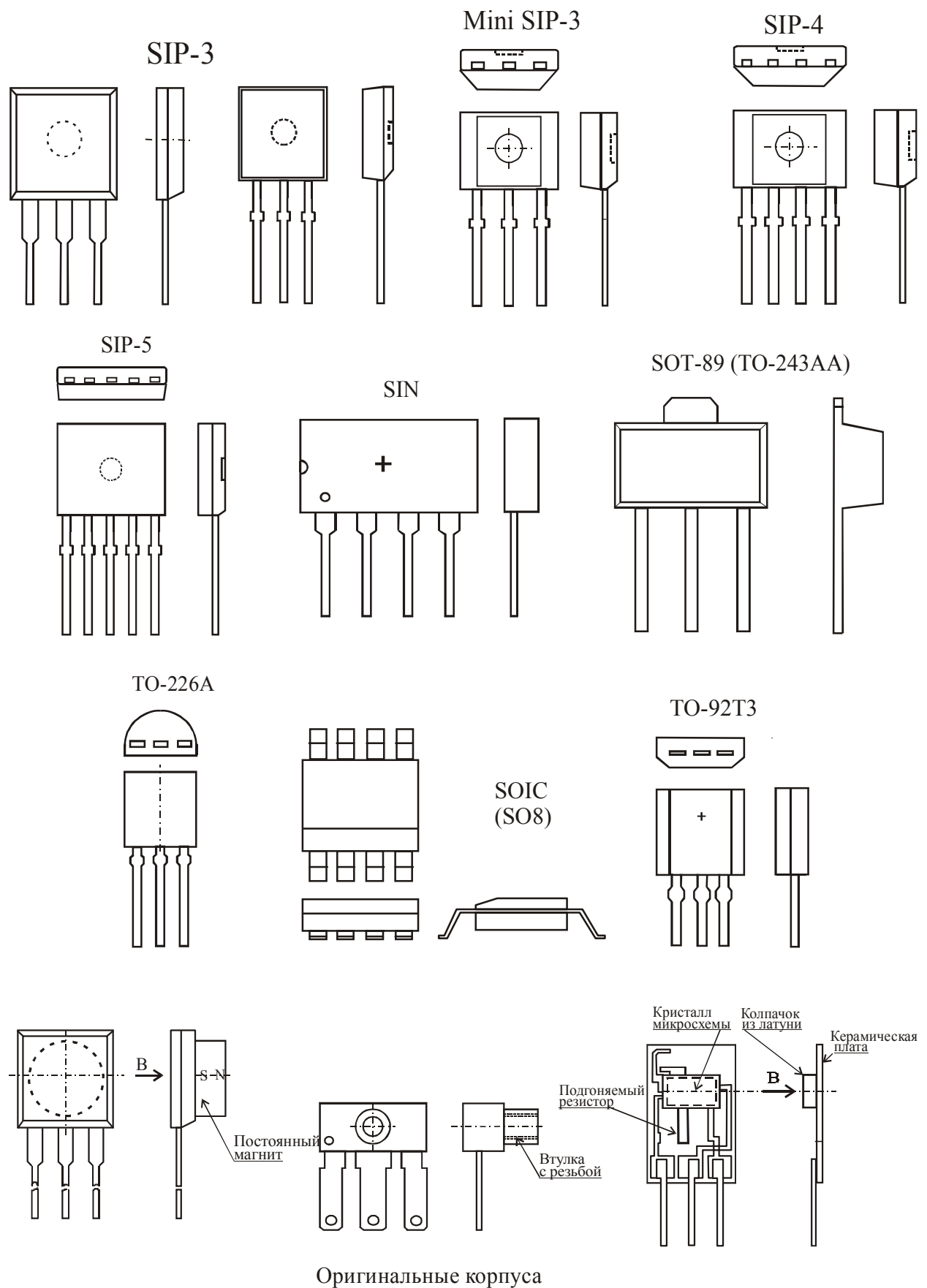


Рис. 3.43. Функциональная схема МУМ типа UGN3132 и UGN3133



Оригинальные корпуса

Рис. 3.42. Внешний вид корпусов магнитоуправляемых интегральных схем, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами

Схемы UGN3132 и UGN3133 обладают высокой магнитной чувствительностью. Индукция срабатывания/отпускаения составляет 3,2/–2 мТл. Электронная схема этих приборов предусматривает температурную компенсацию изменения параметров и защиту от перенапряжения и обратной полярности источника питания.

Напряжение питания схем составляет 4,5–24 В при токе потребления 4,3–9 мА. Схемы размещаются в миниатюрных пластмассовых корпусах типа ТО-243 и функционируют в диапазоне рабочих температур от –40 до +150 °С.

Схемы UGN3132, UGN3133, 2SSP и 2SSP-6 используются в бесконтактных клавишных модулях, датчиках скорости вращения и датчиках угла поворота в составе схем автомобильной электроники и промышленном оборудовании [37, 45].

Магнитоуправляемые ИС типа А3046

Магнитоуправляемые ИС типа А3046, выпускаемые фирмой Allegro, относятся к МУМ повышенной точности. Они отличаются сложностью электронной схемы, в которой предусматриваются специальные элементы, стабилизирующие положение точки срабатывания/отпускаения во всех условиях эксплуатации.

На рис. 3.44 приводится функциональная схема МУМ типа А3046 (А3056, А3058).

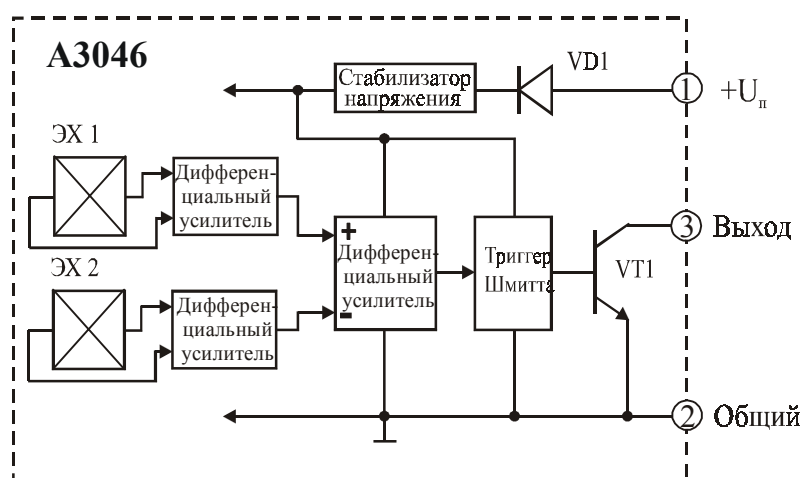


Рис. 3.44. Упрощенная функциональная схема МУМ типа А3046 (А3056, А3058)

Схемы типа А3046 (А3056, А3058) имеют по два элемента Холла, расположенные в одной плоскости на расстоянии 2,23 мм друг от друга. Для повышения чувствительности и точности срабатывания МУМ, как правило, используется дифференциальное включение ЭХ, когда каждый из элементов реагирует на заданную полярность источника управляющего магнитного поля.

Индукция срабатывания/отпускаения схем типа А3046 (А3056, А3058) составляет от 15/–15 мТл до 25/–25 мТл. При этом положение точки срабатывания удерживается на уровне ± 5 ($\pm 7,5$) мТл во всех условиях эксплуатации. Электронная схема этих приборов предусматривает температурную компенсацию изменения параметров, а также защиту от перенапряжения и обратной полярности источника питания. Напряжение питания схем составляет 4,5–24 В при токе потребления 7–14 мА. Схемы размещаются в миниатюрных пластмассовых корпусах типа SIP и функционируют в диапазоне рабочих температур от –40 до +150 °С.

Схемы А3046, А3056, А3058 предназначены для использования в датчиках скорости вращения зубчатых колес, в датчиках угла поворота и в датчиках момента искрообразования в составе схем автомобильной электроники и промышленном оборудовании [24, 32, 33, 34].

При использовании указанных микросхем в качестве датчиков скорости вращения зубчатых колес или скорости перемещения реек из ферромагнитных материалов с обратной стороны МУМ размещается постоянный магнит. Пример размещения кристалла МУМ при измерении скорости вращения зубчатого колеса приведен на рис. 3.45.



Рис. 3.45. Размещение кристалла МУМ и постоянного магнита при работе магнитоуправляемой ИС в качестве датчиков скорости вращения зубчатых колес и перемещения реек из ферромагнитных материалов

Магнитоуправляемые ИС серии TLE 4920

Фирма Siemens выпускает микросхемы типа TLE 4920, TLE 4921-3U и TLE 4923. Функциональная схема этих МУМ приведена на рис. 3.46.

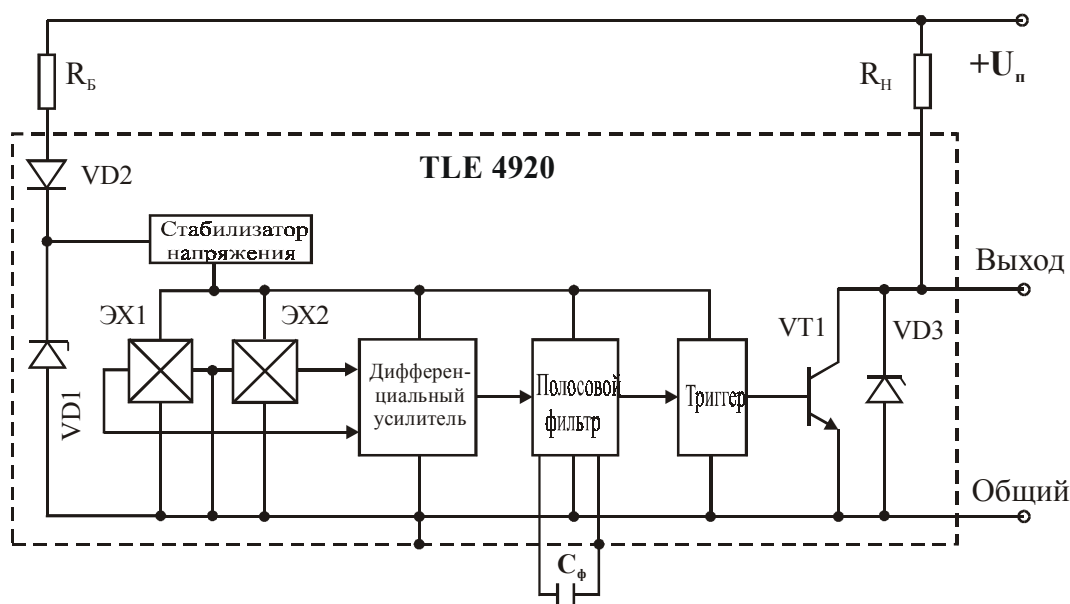


Рис. 3.46. Функциональная схема МУМ типа TLE 4920, TLE 4921-3U и TLE 4923

В микросхемах данной серии используются по два дифференциально включенных элемента Холла и встроенный полосовой фильтр, который настраивается внешним конденсатором C_ϕ на оптимальную частоту. Частота настройки фильтра, например, может определяться скоростью вращения или перемещения контролируемого объекта (зубчатого колеса, рейки, многополюсного магнита и т.п.). Элементы Холла размещены на расстоянии 2,5 мм друг от друга.

Кроме того, схема снабжена защитными элементами, предохраняющими МУМ от повышенного напряжения VD1 и ошибочного подключения полярности источника питания VD2. Диод VD3 предназначен для защиты выходного каскада схемы от бросков тока в индуктивной нагрузке.

Схемы выпускаются в 3-выводном SIP или 8-выводном DIP корпусе, диапазон рабочих температур МУМ от –60 до +180 °С. Микросхемы предназначены для использования в устройствах автомобильной электроники: в датчиках счета числа оборотов и угла поворота зубчатых колес, в датчиках положения объектов и системах электронного зажигания [43, 44].

Микросхемы данной серии могут быть использованы в двухпроводном включении. Вариант такого включения показан на рис. 3.47.

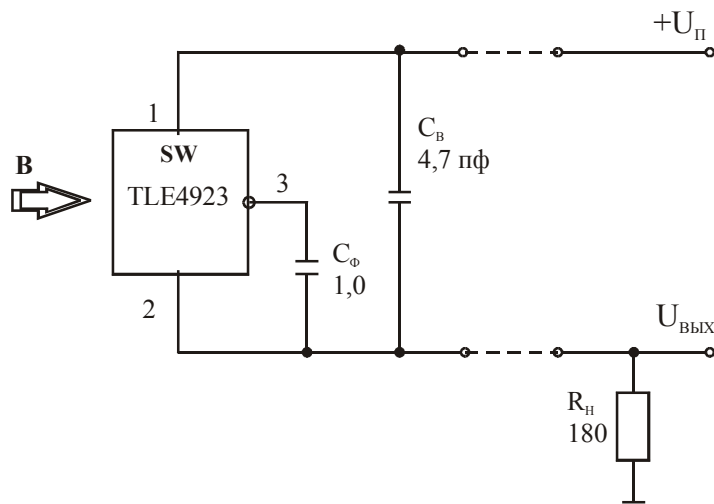


Рис. 3.47. Вариант использования МУМ типа TLE 4923 в двухпроводном включении

Магнитоуправляемые ИС типа UGN3235

Биполярные магнитоуправляемые ИС типа UGN3235, выпускаемые фирмой Sprague, снабжены двумя комплементарными выходами. Многие зарубежные фирмы производят такие микросхемы. Наибольшую известность получили следующие типы МУМ: UGN 3225K, UGN3235, UGN3275, UGN3276, UGN3277, UGN5275K, UGN5276K, UGN5277K, UGN3625, UGN3626, выпускаемые фирмами Sprague и Allegro. Схемы отличаются конструкцией и уровнем магнитоэлектрических параметров [25, 26, 27, 40]. Параметры МУМ типа UGN5275K, UGN5276K, UGN5277K, UGN3625, UGN3626 рассмотрены в главе 13.

Приведем некоторые параметры магнитоуправляемых микросхем типа UGN3235. Упрощенная функциональная схема МУМ типа UGN3235 показана на рис. 3.48.

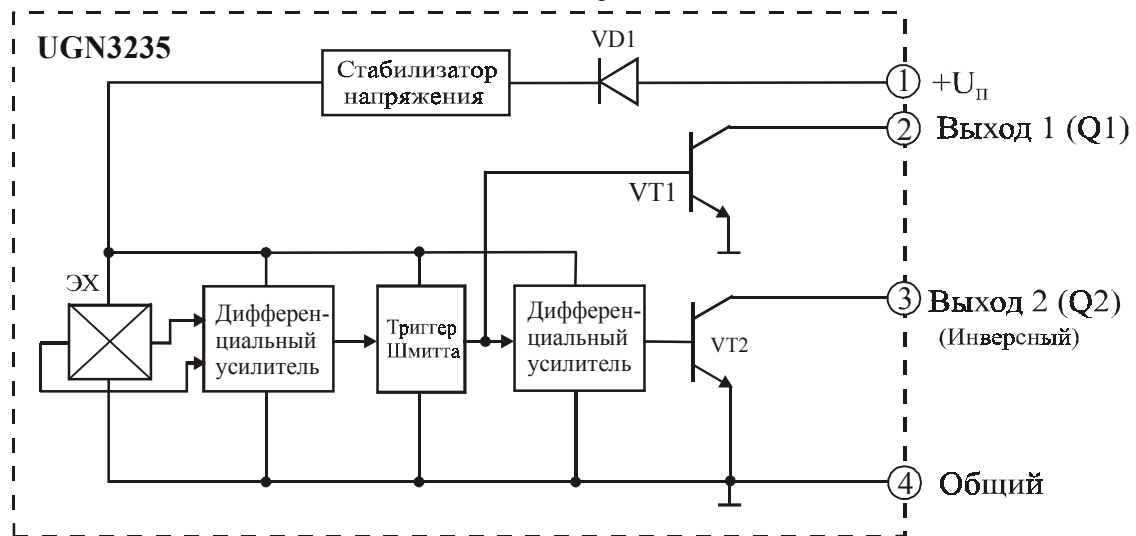


Рис. 3.48. Упрощенная функциональная схема МУМ типа UGN3235

Электронная схема МУМ типа UGN3235 включает один элемент Холла, дифференциальный усилитель, два триггера, стабилизатор напряжения и два выходных транзистора VT1 и VT2 с открытым коллектором. Для стабилизации рабочих точек переключения прибор снабжен схемой термостабилизации. Диод VD1 служит для защиты прибора от изменения полярности источника питания.

Схема работает следующим образом. Один из выходов 1 открывается при воздействии на ЭХ магнитного поля положительной полярности (южный полюс магнита), другой 2 – открывается при воздействии магнитного поля отрицательной полярности (северный полюс магнита).

Когда магниточувствительный элемент МУМ находится в области магнитного поля положительной полярности при $B > B_{сраб}$, то на выходе 1 устанавливается уровень логической 1, а выход 2 остается в неизменном состоянии. При $B < B_{отп}$ на выходе 1 устанавливается уровень логического 0, а выход 2 по-прежнему остается в неизменном состоянии. Аналогичным образом функционирует выход 2, но при воздействии магнитного поля отрицательной полярности.

Индукция срабатывания/отпускания для выхода 1 составляет $(5-17) / (2,3-16)$, а для выхода 2 соответственно $-(17-5) / -(16-2,5)$ мТл. Величина гистерезиса лежит в пределах от 1,5 до 10 мТл. Напряжение питания МУМ составляет от 4,5 до 24 В при токе потребления 6–8 мА. Ток коммутации – до 50 мА.

Схемы размещаются в миниатюрных пластмассовых корпусах типа SIP-4 и функционируют в диапазоне рабочих температур от -25 до $+85$ °C [27].

Магнитоуправляемые схемы типа UGN 3225K и UGN 3235K предназначены для использования в качестве датчиков положения ротора (ДПР) вентильных электродвигателей и в преобразователях типа «угол–код» и системах высокоскоростного считывания информации.

Магнитоуправляемые ИС типа HAL300, HAL320

Магнитоуправляемые ИС типа HAL300, HAL320 относятся к серии микросхем, выпускаемых фирмой Micronas intermetal с применением КМОП технологии. В состав данной серии входит более двадцати типов МУМ, в том числе: HAL101–HAL103, HAL114, HAL115, HAL200–HAL203, HAL300, HAL320, HAL501–HAL506, HAL508, HAL525, HAL556, HAL566, HAL628, HAL638.

Микросхемы серии HAL отличаются сложной схмотехникой и обладают высокими магнитоэлектрическими и эксплуатационными параметрами. Основные параметры МУМ приведены в главе 13. Микросхемы типа HAL556, HAL566, HAL628 и HAL638 могут использоваться в двухпроводном включении.

Приведем краткую характеристику ультраточувствительной биполярной дифференциальной МУМ типа HAL300, функциональная схема которой показана на рис. 3.49.

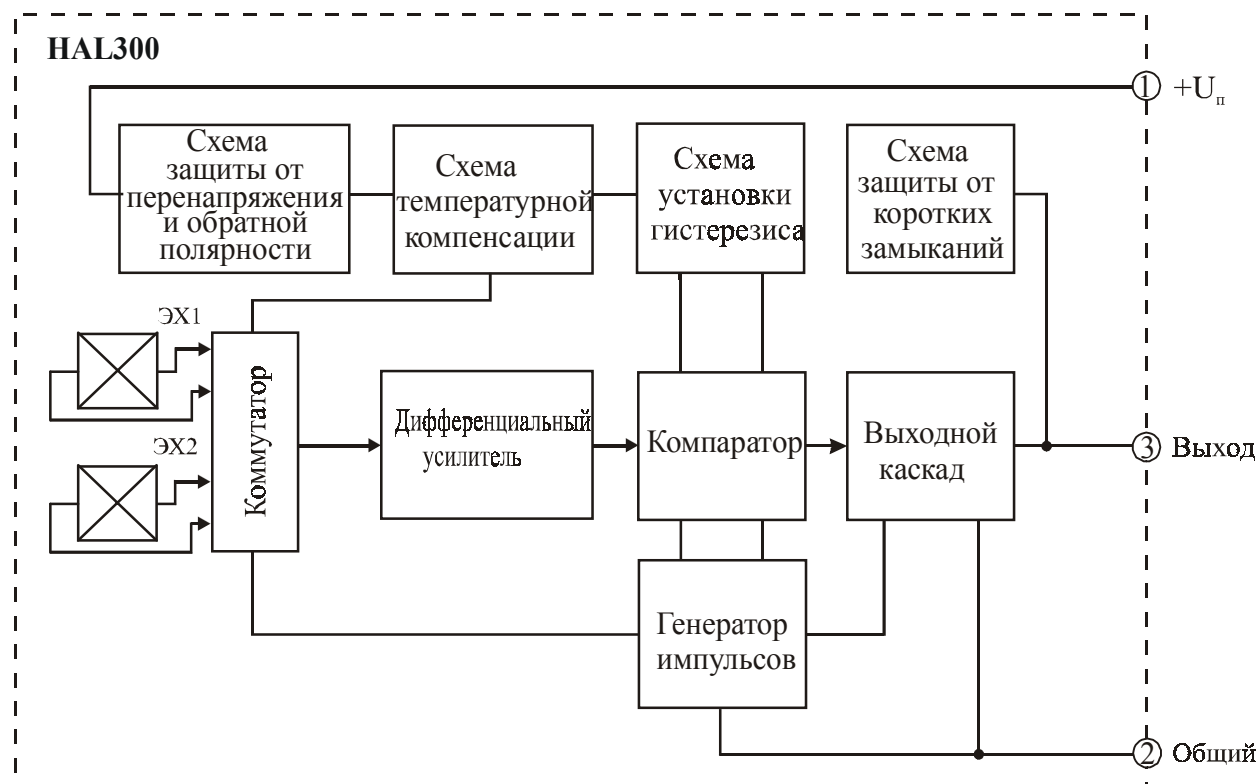


Рис. 3.49. Функциональная схема МУМ типа HAL300, HAL320

Схемы типа HAL300, HAL320 имеют по два элемента Холла, расположенных в одной плоскости на расстоянии 2,05 мм друг от друга. При этом элементы Холла поочередно подключаются на вход дифференциального усилителя. Выходной каскад МУМ выполнен по схеме с открытым стоком.

Электронная схема этих приборов предусматривает температурную компенсацию изменения параметров и защиту от перенапряжения и обратной полярности источника питания.

Индукция срабатывания/отпускаания схем типа HAL300 составляет 1,2/–1,0 мТл. При этом положение точки срабатывания удерживается на уровне $\pm 0,1$ мТл при всех условиях эксплуатации. Напряжение питания схем составляет 4,5–24 В при токе потребления 2,5–7,5 мА.

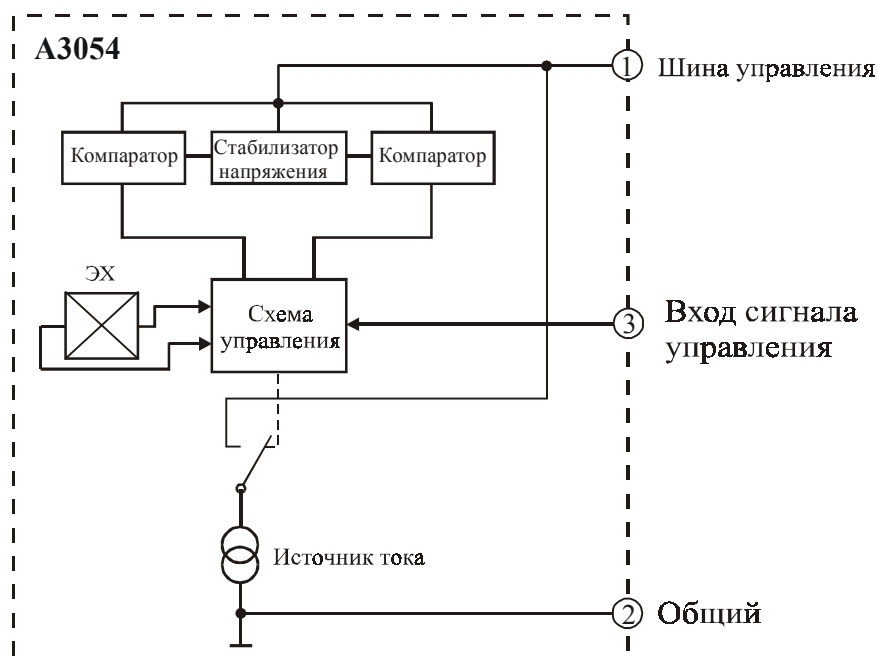
Схемы размещаются в миниатюрных пластмассовых корпусах типа SOT, SO-89A, TO-92 и функционируют в диапазоне рабочих температур от -40 до $+170$ °C.

МУМ для двухпроводных применений типа A3054

В некоторых конкретных случаях для передачи сигналов МУМ и управления объектами контроля требуется использование двухпроводных линий. В принципе любую трехпроводную магнитоуправляемую микросхему можно использовать в качестве двухпроводной. Однако существуют типы МУМ специально спроектированные для двухпроводных применений. К таким микросхемам относятся МУМ типа HAL556, HAL566, HAL628, HAL638, а также мультиплексные магнитоуправляемые микросхемы UGN3055 (фирма Sprague) и A3054 (фирма Allegro).

Приведем краткую характеристику мультиплексной МУМ типа A3054, функциональная схема которой показана на рис. 3.50.

Рис. 3.50. Упрощенная функциональная схема мультиплексной МУМ типа A3054



Эти МУМ объединяют в одном кристалле малощумящие биполярные и высокоплотные КМОП структуры. Основная особенность МУМ типа A3054 заключается в возможности предварительного программирования индивидуального адреса микросхем на стадии изготовления с последующим считыванием информации о ее состоянии в процессе эксплуатации прибора.

Индукция срабатывания/отпускаания для МУМ типа A3054 составляет $(5-30) / (0,5-29,5)$ мТл при величине гистерезиса в пределах от 0,5 до 5,0 мТл. Напряжение питания микросхем составляет от 15 до 18 В при токе потребления 1,4–2,5 мА. Ток коммутации – до 20 мА.

На стадии изготовления партии микросхем до 30 шт. каждой их них присваивается адрес от 01 до 30, который указывается в маркировке на корпусе МУМ. Затем схемы включаются в двухпроводную систему, как показано на рис. 3.51. Ключ SW1 позволяет определять состояние микросхемы при отсутствии магнитного поля.

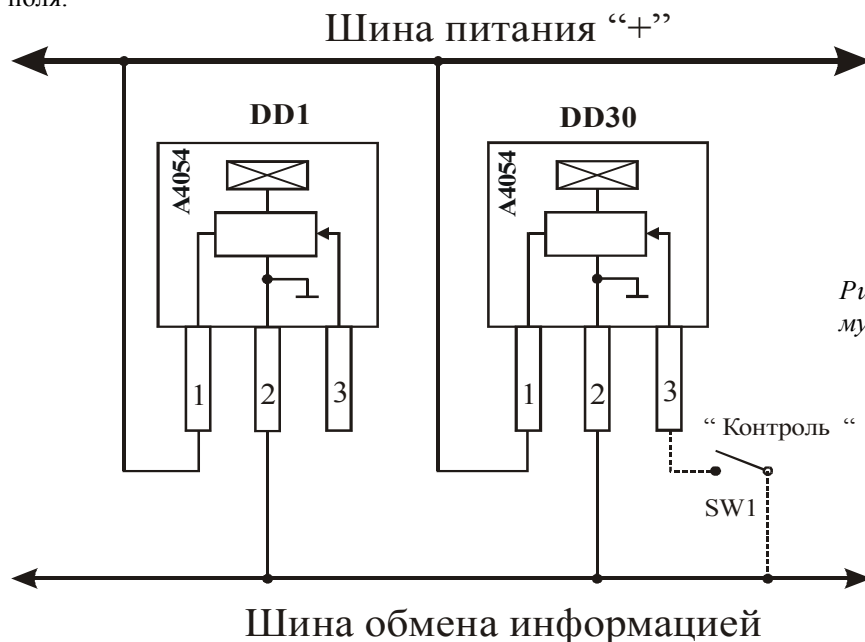
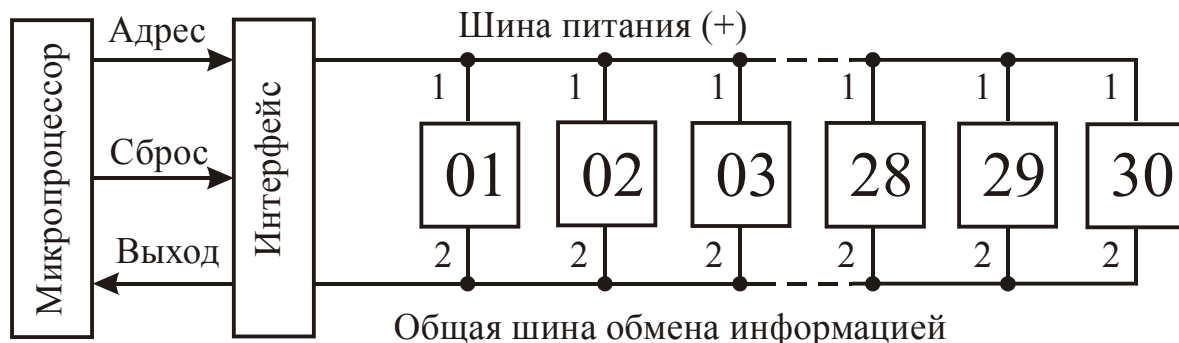


Рис. 3.51. Схема соединений мультиплексных МУМ типа A3054

Схемы размещаются в миниатюрных пластмассовых корпусах типа mini-SIP и функционируют в диапазоне рабочих температур от -40 до $+125$ °C.

Микросхемы серий А4054 (UGN3055), как правило, используются в многоканальных системах автоматизированного контроля и управления объектами. В этом случае они объединяются в двухпроводные системы, в которых используется распределенная по времени мультиплексная схема, обеспечивающая передачу информации между контроллерами и МУМ. На рис. 3.52 приведена схема соединений мультиплексных МУМ в двухпроводную информационную систему.



01....30 - микросхемы А3054 (UGN3055).

Рис. 3.52. Схема соединений нескольких мультиплексных МУМ типа А3054 в двухпроводную информационную систему

В данной схеме (рис. 3.52) управление и опрос состояния микросхем производится микропроцессором главного контроллера через специальный интерфейс. Передача и прием информации происходит за счет модулирования питающего напряжения с частотой опроса до 10 кГц. Возможная схема интерфейса приведена на рис. 3.53.

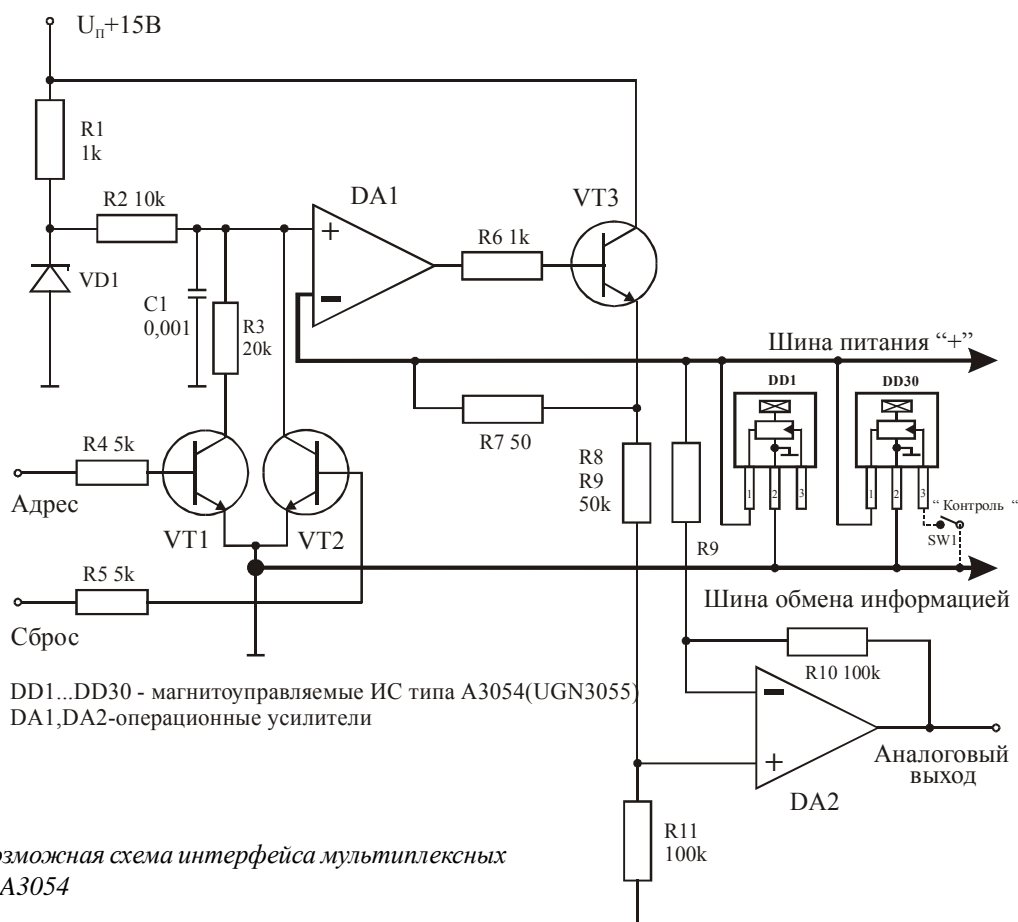


Рис. 3.53. Возможная схема интерфейса мультиплексных МУМ типа А3054

Мультиплексные МУМ типа А3054 (UGN3055) применяются в системах автомобильной электроники и охранной сигнализации, когда требуется опрос многочисленных точек контроля, соединенных одной двухпроводной линией [39].

МУМ повышенной точности типа А3421, А3422

Фирма Allegro выпускает магнитоуправляемые схемы повышенной точности типа А3421 и А3422, которые предназначены для определения скорости и направления вращения зубчатых колес или многополюсных магнитов. Они отличаются сложностью электронной схемы, в которой предусматриваются специальные элементы, стабилизирующие положение точки срабатывания/отпускаания во всех условиях эксплуатации. Кроме того, в электронной схеме таких МУМ размещают специальные узлы, позволяющие выводить информацию о скорости и о направлении вращения или перемещения объектов контроля.

Микросхемы снабжены двумя элементами Холла, размещенными в одной плоскости на расстоянии 1,5 мм друг от друга. Электронная схема этих приборов предусматривает температурную компенсацию изменения параметров, а также защиту от перенапряжения и обратной полярности источника питания.

Напряжение питания микросхем типа А3421 и А3422, составляет от 4,5 до 18 В при токе потребления 5–18 мА. Ток коммутации до 30 мА.

Индукция срабатывания/отпускаания для А3421 составляет (13–28) / –(28–13) мТл при величине гистерезиса в пределах от 28 до 33,5 мТл. Индукция срабатывания/отпускаания для А3422 составляет (2,9–7,7) / –(7,7–18) мТл при величине гистерезиса в пределах от 28 до 33,5 мТл.

Схемы размещаются в миниатюрных пластмассовых корпусах типа SIP и функционируют в диапазоне рабочих температур от –40 до +150 °С.

На рис. 3.54. приведена функциональная схема МУМ типа А3421, А3422, а на рис. 3.55 показаны эпюры напряжений сигналов на выходе микросхемы при регистрации скорости и направления вращения многополюсного магнита [34].

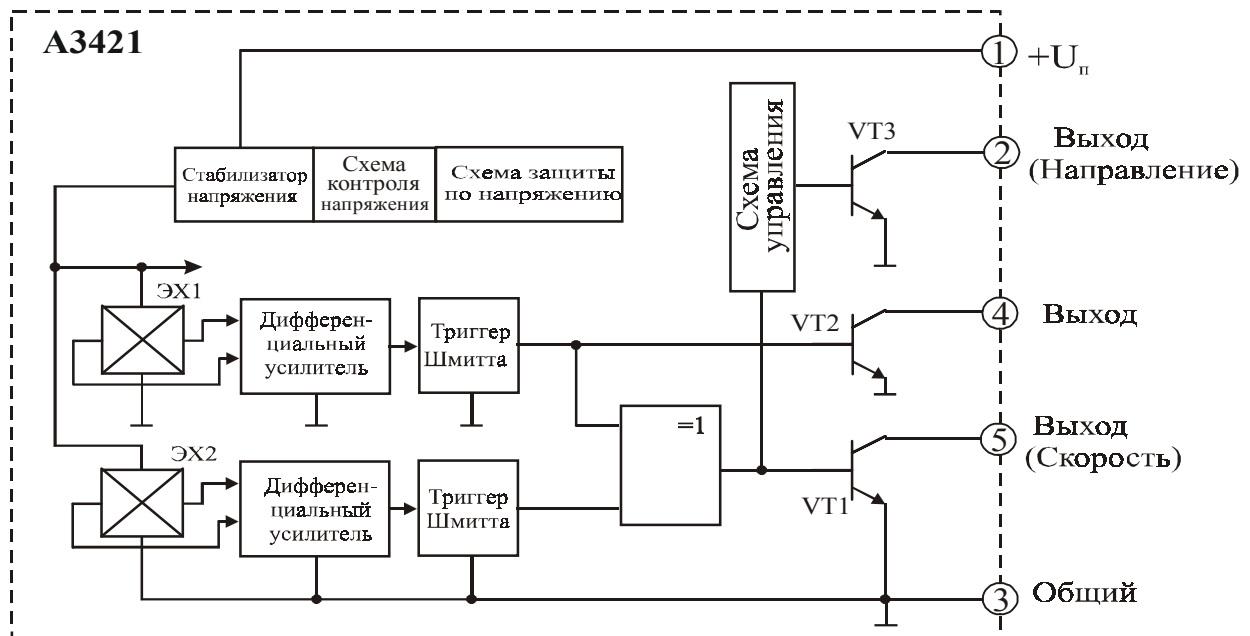
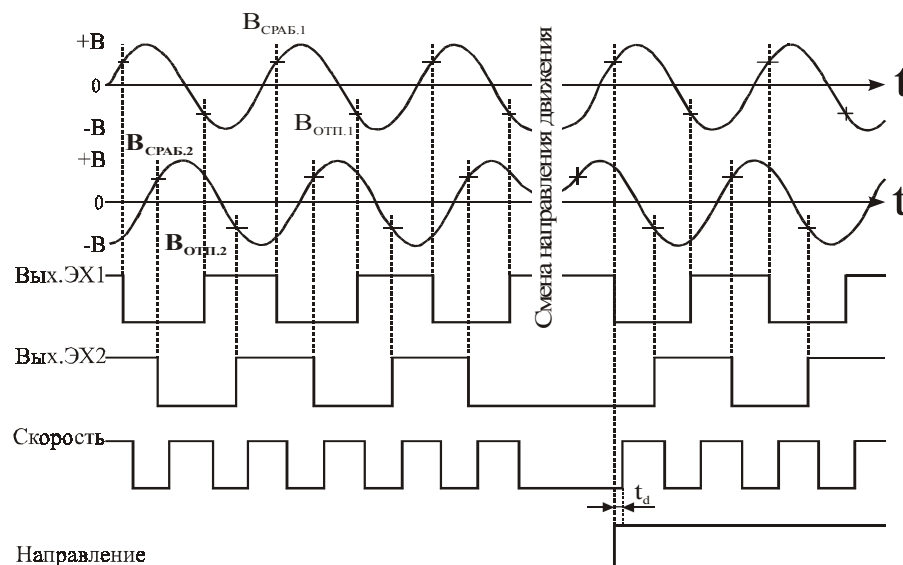


Рис. 3.54. Упрощенная функциональная схема МУМ типа А3421, А3422



t_d - время задержки при смене направления движения

Рис. 3.55. Эпюры напряжений сигналов на выходе МУМ типа А3421, А3422 при регистрации вращения (перемещения) многополюсного магнита

Параметры других типов магнитоуправляемых интегральных схем, выпускаемых ведущими производителями приводятся в главе 13 тома 2.

3.2.4. Применение магнитоуправляемых ИС

Практически все магнитоуправляемые микросхемы могут использоваться непосредственно в качестве цифровых датчиков магнитного поля. Основные преимущества магнитоуправляемых микросхем по сравнению с другими преобразователями физических (неэлектрических) величин – простота обеспечения практически идеальных механической, электрической, тепловой и других видов развязки измерительных и управляющих цепей от объектов контроля, а также большой динамический диапазон и возможность непосредственного сопряжения со стандартными логическими узлами.

Магнитоуправляемые и магниточувствительные микросхемы применяются в качестве чувствительных элементов в функционально-ориентированных магнитных датчиках электрического тока и напряжения, скорости и направления вращения, угла поворота и конечного положения, расхода жидкости и газа и т.д. Их используют в бесконтактных (вентильных) электродвигателях, устройствах аварийной и охранной сигнализации, бесконтактных системах электронного зажигания горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания, в системах автостопа и бытовой радиоаппаратуре, в металлоискателях и дефектоскопах, в электронных предохранителях, в клавиатуре ЭВМ и телефонных аппаратах.

Потребителями микросхем серии К1116КП на начало 1991 года являлось более 300 предприятий и организаций, из них крупными потребителями (более 5000 штук в год) – около 50-и предприятий. При этом сферы применения МУМ определились следующим образом:

- | | |
|---|------|
| • бесконтактная клавиатура | 31%; |
| • датчики положения и приближения | 26%; |
| • датчики положения ротора (ДПР) вентильных электродвигателей | 23%; |
| • датчики индекса и скорости вращения привода дисководов ЭВМ | 10%; |
| • прочие области применения | 10%. |

По данным зарубежных производителей магнитоуправляемых интегральных схем, примерно 75% от общего объема продаж МУМ приходится на долю автомобильной электроники, 6–10% приобретается для использования в бесконтактной клавиатуре ПЭВМ и около 5% используется в бесколлекторных электродвигателях постоянного тока.

Средние цены на наиболее распространенные типы МУМ составляют от 0,5 до 2 долларов. Мощные схемы и схемы с расширенными возможностями стоят дороже – 3–5 долларов и более.

Схемы сопряжения и применения МУМ

Магнитоуправляемые микросхемы являются стандартными элементами электронной техники. Они легко сопрягаются с транзисторами, логическими и аналоговыми ИС. Ниже приведены некоторые практические примеры соединения МУМ со стандартными элементами электронной техники.

На рис. 3.56 и 3.57 даны схемы включения МУМ с энергоемкой нагрузкой. Схемы не требуют пояснений [16].

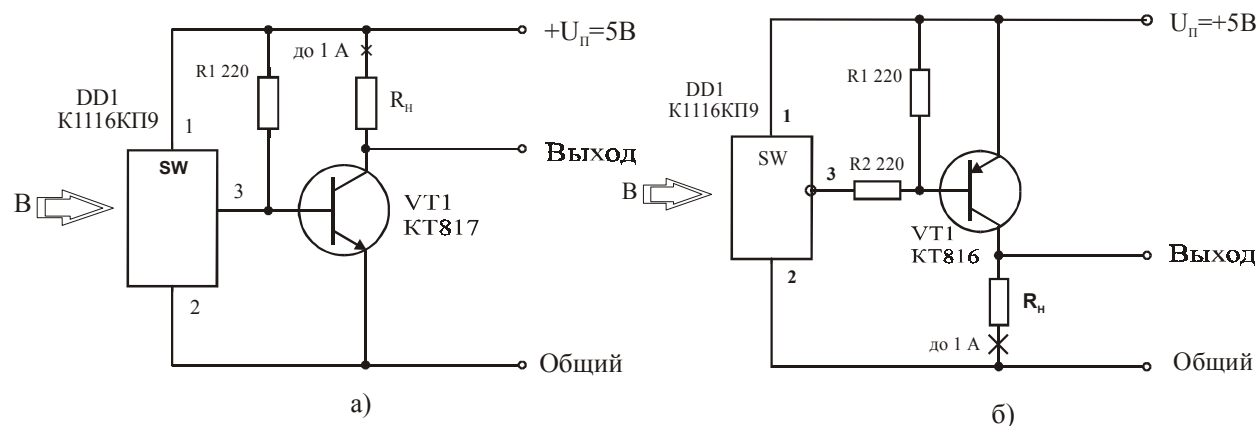


Рис. 3.56. Схема включения МУМ с энергоемкой нагрузкой: а – с р–п–п транзистором; б – с п–п–п транзистором

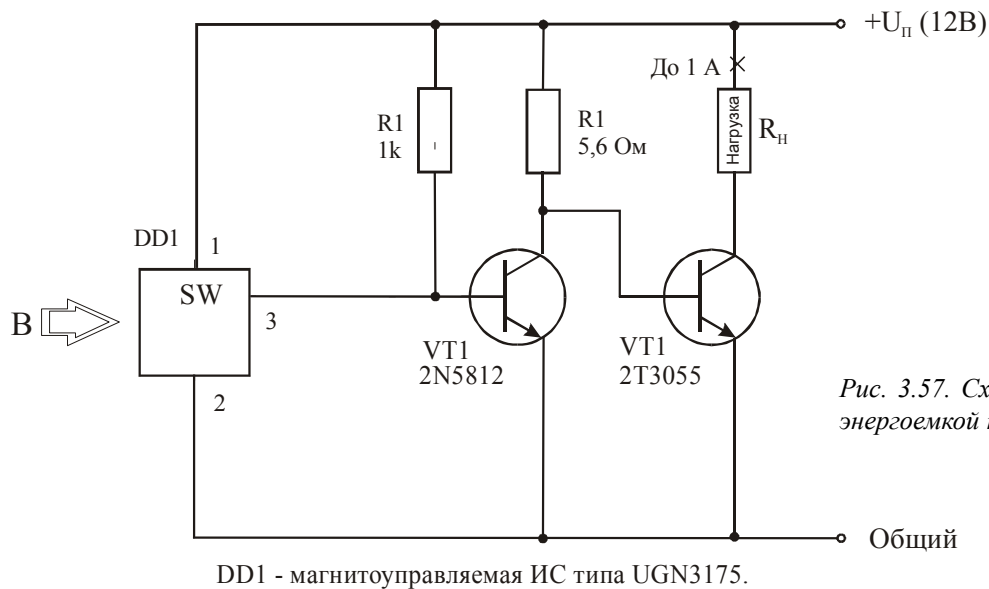


Рис. 3.57. Схема включения МУМ с энергоемкой нагрузкой

На рис. 3.58 приведена схема включения МУМ с использованием ИМС триггера DD2.1, DD2.2 и реверсивного счетчика DD3. Схема работает в униполярном режиме и обеспечивает хорошую помехозащищенность. Она не требует пояснений [16].

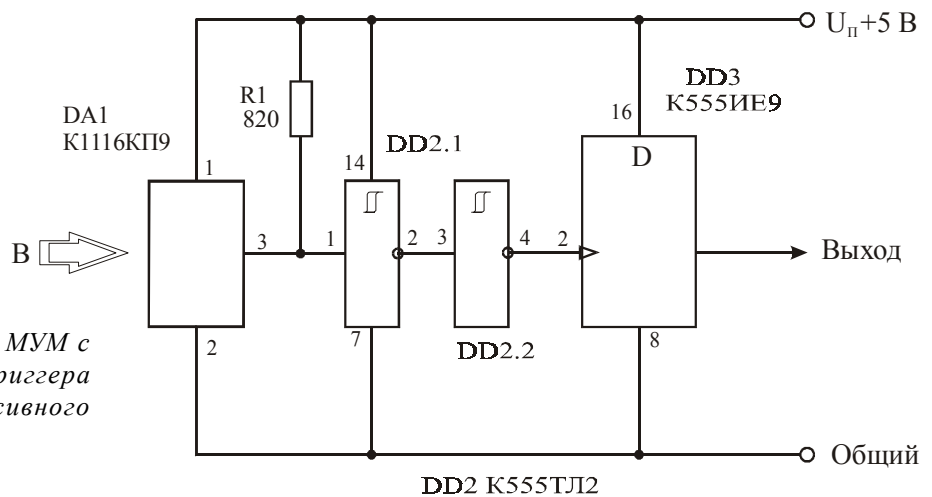


Рис. 3.58. Схема включения МУМ с использованием ИМС триггера DD2.1, DD2.2 и реверсивного счетчика DD3

На рис. 3.59 приведена схема включения МУМ для передачи сигнала по двухпроводной линии.

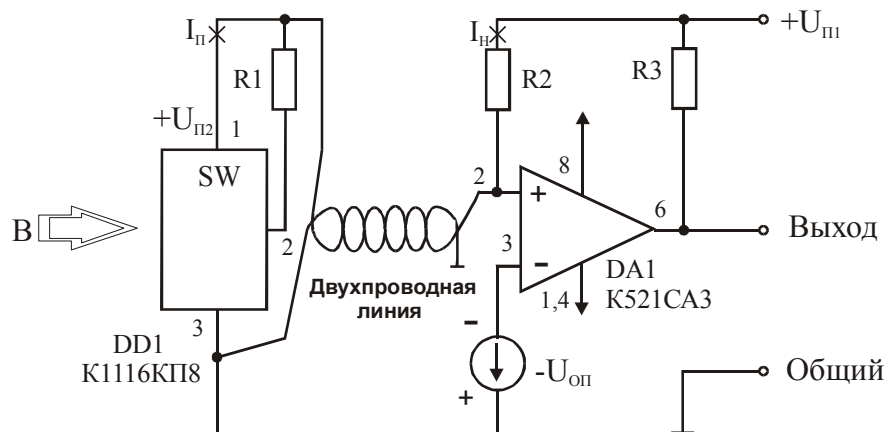


Рис. 3.59. Схема включения МУМ для передачи сигнала по двухпроводной линии

Если магнитоуправляемая ИС располагается на значительном удалении от схемы управления, то для соединения ее с последней можно применить стандартную двухпроводную линию вместо трехпроводной.

Схема (рис. 3.59) работает следующим образом. При воздействии управляющего магнитного поля с $B > B_{ср\text{аб}}$ происходит возрастание тока в линии на величину тока нагрузки I_H , потребляемого выходным транзистором МУМ через резистор R1. Разность токов «включено» и «выключено» дает на резисторе R2 схемы управления соответствующее приращение напряжения.

Этот скачок напряжения фиксируется компаратором K521CA3 (DA1) относительно опорного напряжения $U_{оп.}$:

При $R_{ли} \ll R2$ верхний и нижний пределы опорного напряжения $U_{оп.}$ компаратора могут определяться по следующей формуле:

$$[U_{п1} - (I_{п} \times R2)] < U_{оп} < [U_{п1} - (I_{п} + I_H) \times R2] \quad (3.9)$$

где $U_{п1}$ – напряжение питания;

$I_{п}$ – ток потребления МУМ;

I_H – ток нагрузки МУМ.

На рис. 3.60 приведена схема включения двух (и более) МУМ по выходу, соединенных параллельно. Схема выполняет логическую операцию И: $Q = A \times B$.

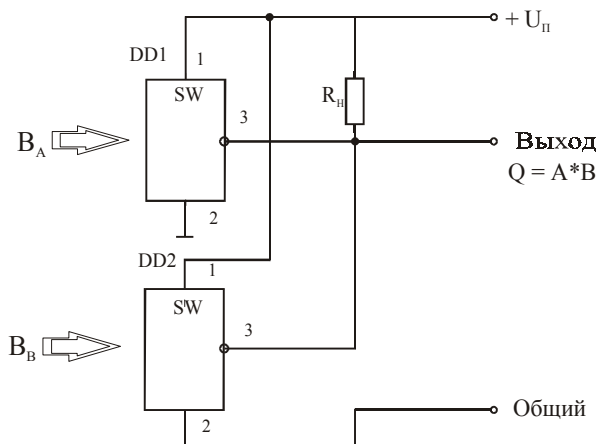


Рис. 3.60. Схема включения двух МУМ по выходу, соединенных параллельно

На рис. 3.61 даны схемы двух индикаторов, срабатывающих при увеличении индукции управляющего магнитного поля до величины $B > B_{ср\text{аб}}$. Схемы не требуют пояснений [16].

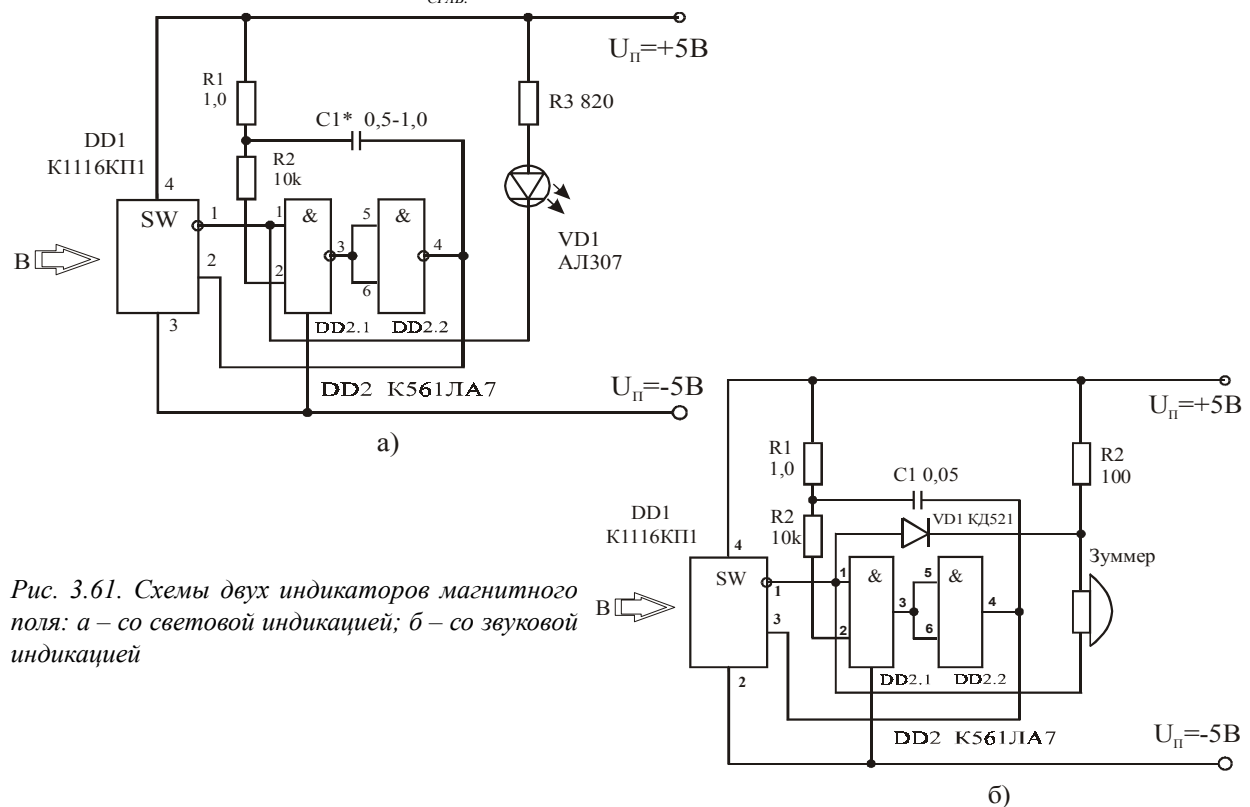


Рис. 3.61. Схемы двух индикаторов магнитного поля: а – со световой индикацией; б – со звуковой индикацией

На рис. 3.62 приведена схема аналогового ограничителя числа оборотов, работающего в паре с многополюсным магнитом, закрепленным на вращающемся валу объекта контроля. Схема генерирует отрицательный сигнал «Стоп», когда накапливаемый по мере поступления входных импульсов «лестничный сигнал» на входе компаратора DA2 превысит входное напряжение [16].

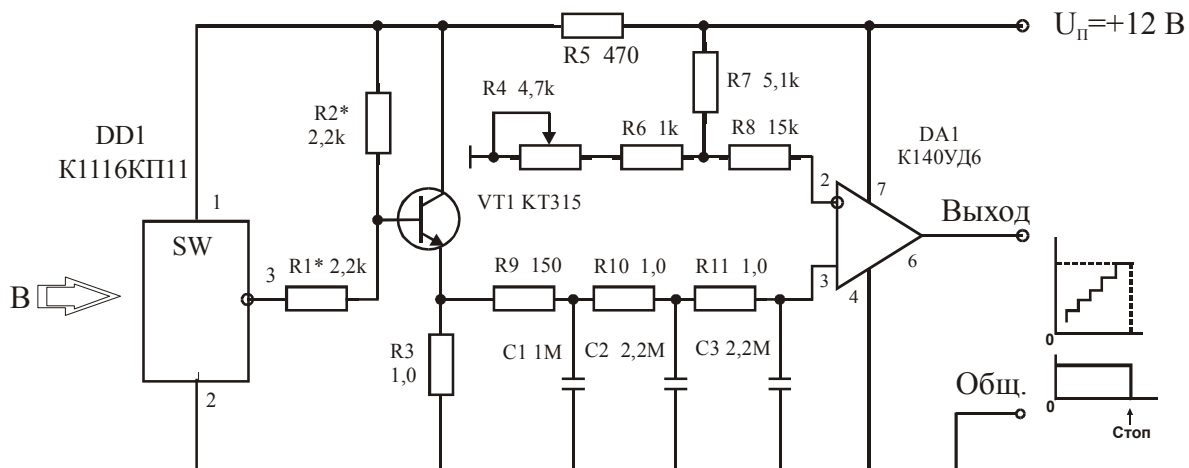


Рис. 3.62. Схема аналогового ограничителя числа оборотов, работающего в комплекте с многополюсным магнитом

На рис. 3.63 приведена схема для определения направления вращения многополюсного магнита, используемого в счетчике числа оборотов вала.

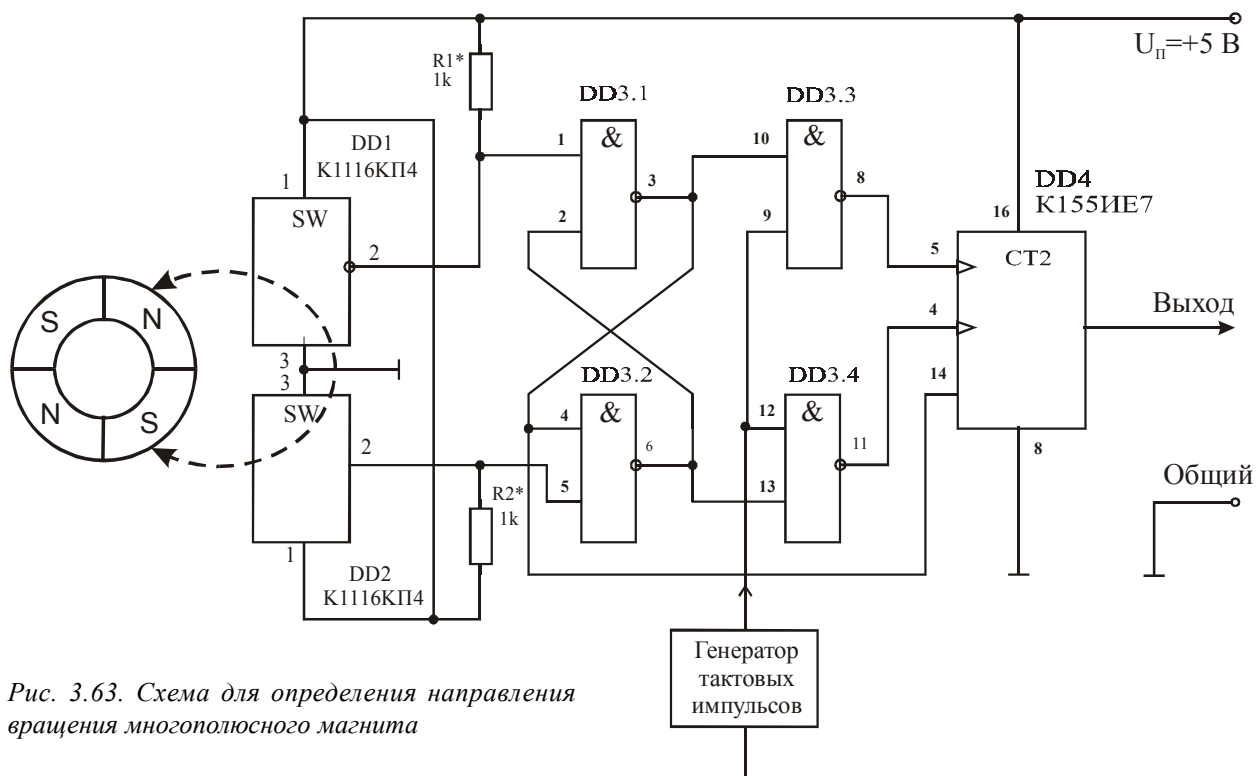


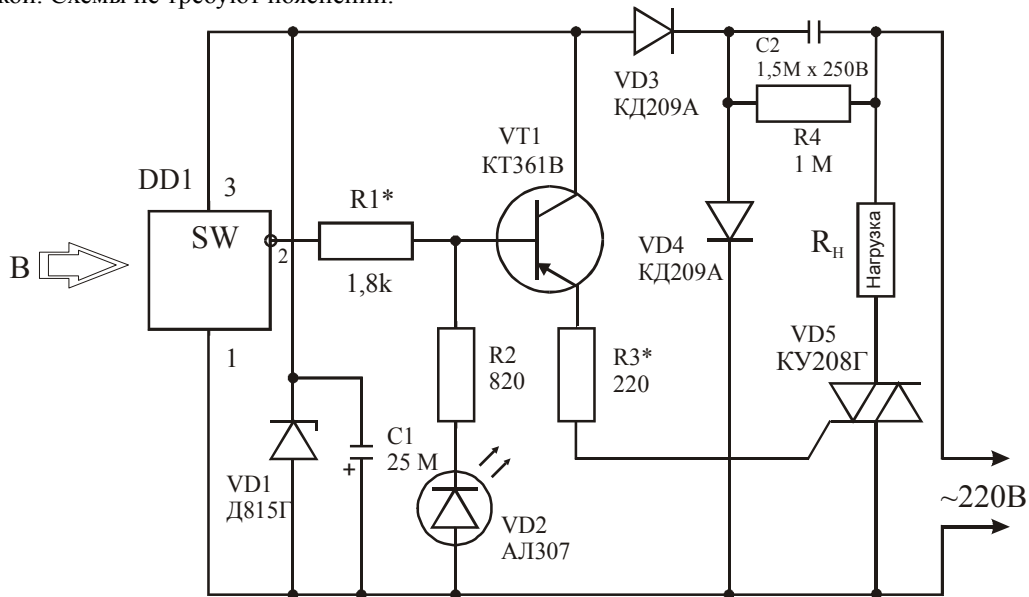
Рис. 3.63. Схема для определения направления вращения многополюсного магнита

Схема (рис. 3.63) работает следующим образом. Обе магнитоуправляемые микросхемы DD1 и DD2 располагаются вблизи многополюсного кольцевого магнита, установленного на вращающейся детали объекта контроля. Если магнит вращается против часовой стрелки, то южный полюс магнита пройдет от микросхемы DD2 до микросхемы DD1, что меньше времени полного оборота. Если магнит вращается по часовой стрелке, то время прохождения южного полюса от DD2 до DD1 занимает большую часть периода оборота. Сравнив интервалы времени между включениями микросхем DD2 и DD1 со временем оборота (относительно включения DD2), можно определить направление вращения.

Генератор (ГТИ) вырабатывает тактовые импульсы. Реверсивный счетчик DD4 (up/down) считает эти импульсы на увеличение (up), начиная от включения DD2 и останавливаясь после включения DD1. За оставшуюся часть оборота содержимое счетчика уменьшается (считает down). Короткий интервал времени между моментами включения DD2 и DD1 приводит к тому, что меньше импульсов прибавляется, чем вычитается, из-за чего на выходе счетчика появляется сигнал TC – счет закончен.

За время длинной части периода между включениями DD2 и DD1 больше импульсов добавляется, чем вычитается, и на выходе счетчика сигнала ТС – окончания счета – нет. В рассматриваемой схеме это соответствует вращению по часовой стрелке. При вращении против часовой стрелки сигнал ТС появляется каждый оборот магнита [16].

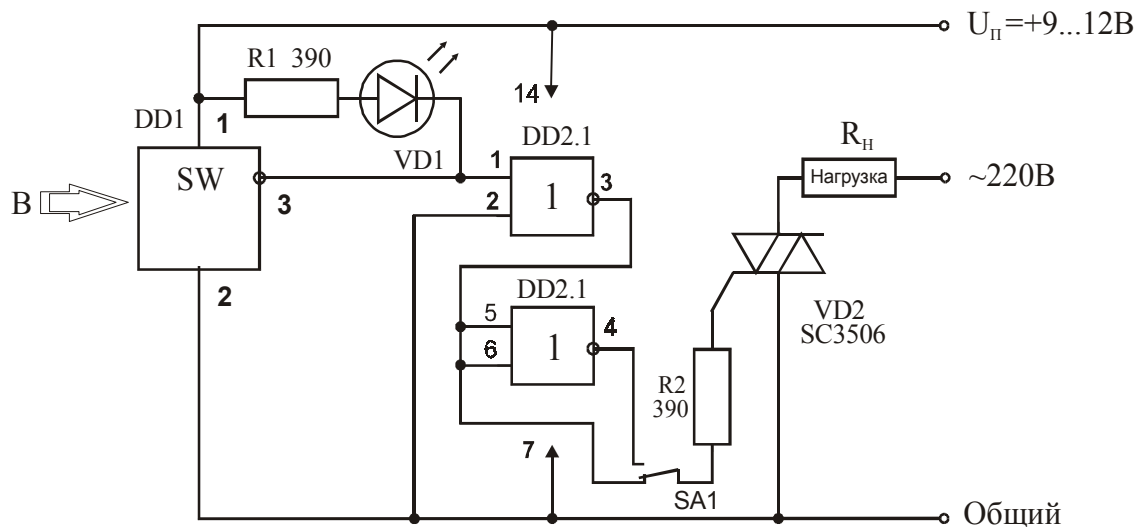
На рис. 3.64–3.67 приведено еще несколько схем магнитоэлектронных устройств, управляемых магнитным полем. Эти устройства питаются от сети переменного тока и позволяют управлять достаточно мощной нагрузкой. Схемы не требуют пояснений.



DD1 - магнитоуправляемая микросхема К1116КПЗ

Рис. 3.64. Схема магнитоэлектронного устройства, управляемого магнитным полем. Устройство питается от сети переменного тока

На рис. 3.65 приведена схема магнитоуправляемого выключателя сетевого напряжения.



DD1 - магнитоуправляемая ИС типа UGN3013

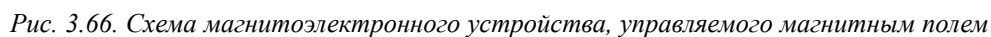
DD2.1, DD2.2 - микросхема ИЛИ-НЕ типа CD4001

VD2 - симистор типа SK3506 (ток нагрузки 2,5 А)

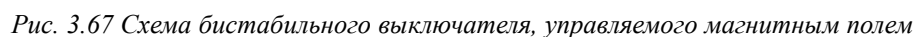
Рис. 3.65. Схема магнитоуправляемого выключателя сетевого напряжения

В качестве ключа служит небольшой магнит из феррита бария, который может перемещаться вдоль корпуса магнитоуправляемой ИС (DD1) и выполнять функцию выключателя. Схема (рис. 3.65) не требует пояснений. В качестве схемы управления симистором используется половина ИС типа ИЛИ-НЕ (DD2).

Если переключатель SA1 находится в верхнем положении, то открытый симистор выключится. Иными словами, если SA1 соединяет управляющий электрод симистора с выводом 3, то при приближении магнита к микросхеме DD1 свет включается. Если же SA1 подключает управляющий электрод симистора к выводу 4 схемы DD2, то включенный свет при приближении магнита будет гаснуть [22].



На рис. 3.67 приведена схема бистабильного выключателя, управляемого магнитным полем, предназначенного для управления мощной нагрузкой. Эта схема тоже не требует подробных пояснений.



В схеме рис. 3.67 в качестве ключа служит небольшой магнит из феррита бария. Схема переключается при каждом положительном перепаде напряжения, поступающего с выхода магнитоуправляемой микросхемы DD1, то есть при приближении магнитного ключа. В качестве схемы управления используется сдвоенный D-триггер DD2 [22].

3.3. Совмещенные (магнитооптические) интегральные микросхемы

Многие типы интегральных преобразователей магнитного поля (например, элементы Холла, магнитодиоды, магнитотранзисторы и т.п.) обладают определенной чувствительностью к оптическому излучению. Спектральный диапазон чувствительности таких приборов зависит от материала и от технологии изготовления ПМП и ИС. Для кремниевых приборов диапазон спектральной чувствительности лежит в видимом и ближнем ИК диапазоне в 0,6–1,1 мкм.

Использование свойства фоточувствительности ПМП позволяет создавать *совмещенные магнитооптические интегральные микросхемы*. Внешний вид магнитооптических микросхем приведен на рис. 3.68.

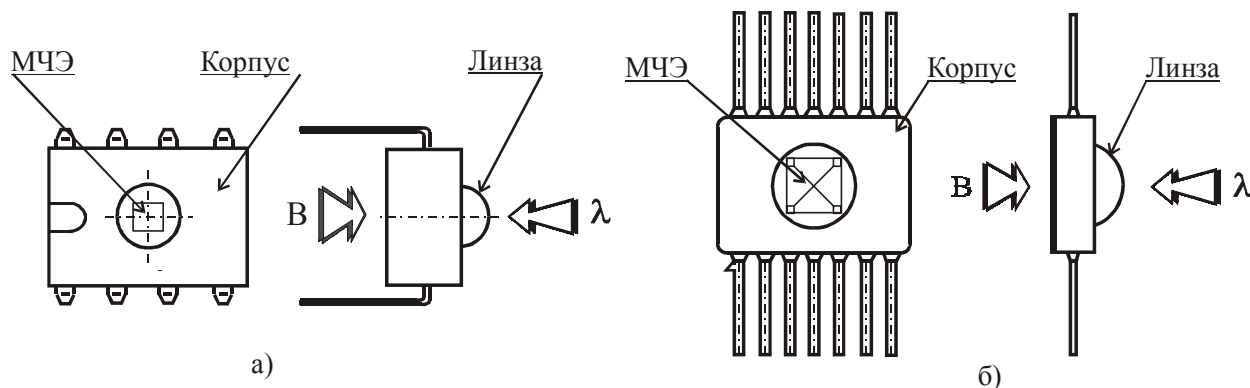


Рис. 3.68. Внешний вид одноканальных магнитооптических микросхем: а – в пластмассовом корпусе; б – в металлокерамическом корпусе

Конструкция совмещенных магнитооптических интегральных микросхем отличается от конструкции традиционных МЧМС и МУМ наличием оптически прозрачного окна или линзы. При этом весь остальной корпус выполняется из немагнитных материалов, непрозрачных для оптического излучения рабочего диапазона ИС. Обычно для этих целей используются специальные типы пластмасс или керамика.

Магнитооптическая микросхема реагирует как на оптическую, так и на магнитную составляющую внешнего воздействия. Логика работы таких микросхем определяется конкретным назначением магнитоэлектронного устройства и условиями его эксплуатации.

По принципу работы магнитооптические микросхемы могут быть аналоговыми или цифровыми.

Аналоговые магнитооптические схемы преобразуют индукцию магнитного поля или (и) поток ИК излучения в сигнал, пропорциональный величине индукции или (и) потоку ИК излучения.

Цифровые магнитооптические схемы выполняют функцию электронных ключей, управляемых магнитным полем или (и) потоком ИК излучения.

В качестве источника оптического излучения для управления магнитооптическими ИС используются ИК источники (например, излучающие или лазерные диоды).

На рис. 3.69 приведены два возможных варианта выходных характеристик аналоговой магнитооптической микросхемы. При этом рассматривается вариант только одного вида воздействия одновременно (оптического или магнитного).

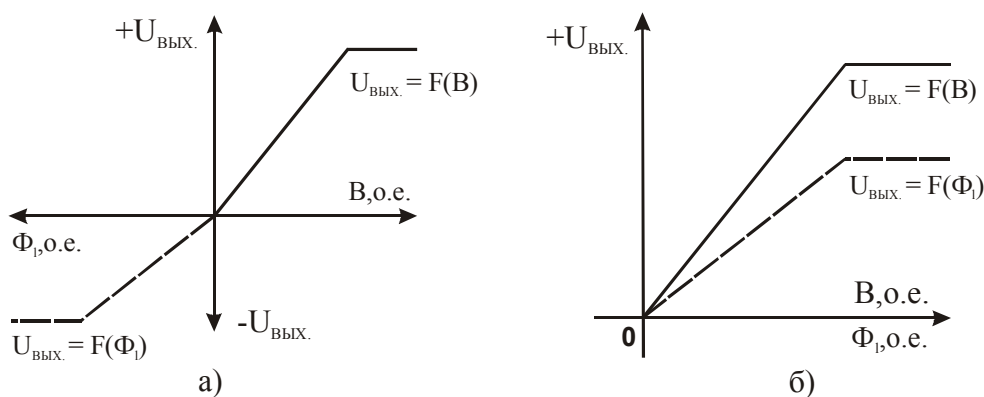


Рис. 3.69. Возможные варианты выходных характеристик аналоговой магнитооптической микросхемы: а – биполярная; б – униполярная

Реакция микросхемы на управляющие факторы может быть различной. При характеристике, приведенной на рис. 3.69.а, воздействие магнитного потока приводит к увеличению (относительно 0) выходного напряжения, а при воздействии потока оптического излучения сигнал растет в сторону отрицательного значения ($-U_{\text{ВЫХ.}}$).

При характеристике, приведенной на рис. 3.69б, реакция микросхемы на управляющие факторы отличается только коэффициентом преобразования, когда $S_B > S_\Phi$.

Варианты применения аналоговых магнитооптических микросхем зависят от решения конкретных технических задач. На рис. 3.70 показан один из возможных вариантов схемы включения аналоговой магнитооптической ИС.

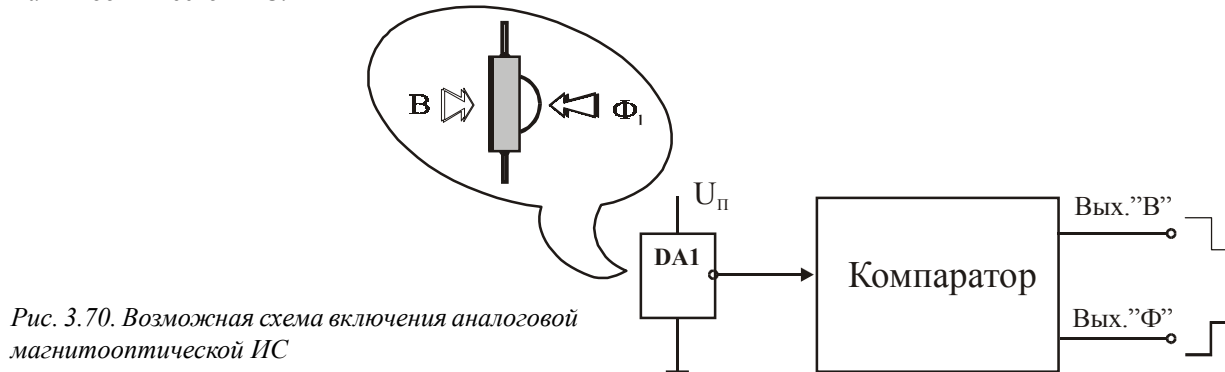


Рис. 3.70. Возможная схема включения аналоговой магнитооптической ИС

Схема (рис. 3.70) состоит из магнитооптической ИС (DA1) и двухвыходного компаратора напряжения. Она работает следующим образом. При воздействии магнитного поля на выходе компаратора (Вых. «В») появляется сигнал положительной полярности $+U_{\text{ВЫХ. «В»}}$. При смене источника управляющего воздействия на оптический (например, на излучение ИК диода) на выходе компаратора (Вых. «Ф») появится сигнал отрицательной полярности $-U_{\text{ВЫХ. «Ф»}}$.

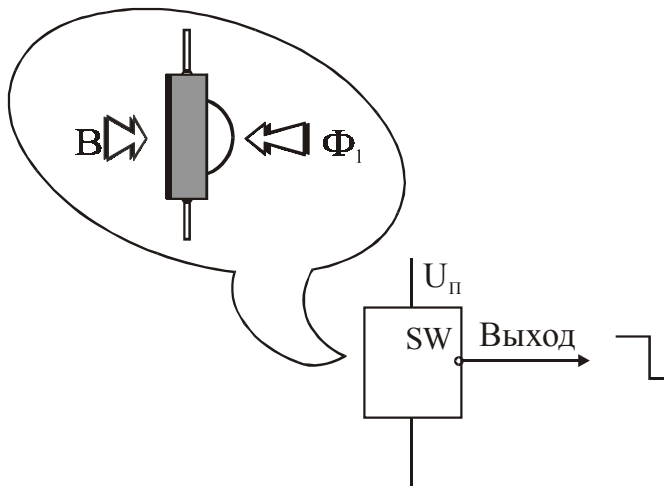


Рис. 3.71. К пояснению принципа работы цифровой магнитооптической микросхемы

Принцип работы цифровой магнитооптической микросхемы приводится на рис. 3.71 и практически не отличается от принципа работы МУМ, но для управления ее состоянием используются магнитное поле или (и) поток ИК излучения.

Возможны следующие варианты использования цифровой магнитооптической ИС:

1. Исходное состояние ИС – «выключено», $B = 0$. При включении источника ИК излучения ($\Phi > \Phi_{\text{СРАБ}}$ и $B = 0$) микросхема переходит в состояние «включено», при $\Phi < \Phi_{\text{ОТП}}$ схема возвращается в исходное состояние.
2. Исходное состояние ИС – «выключено», $B = 0$. При приближении к поверхности ИС постоянного магнита с $B > B_{\text{СРАБ}}$ ($\Phi = 0$) микросхема переходит в состояние «включено», при $B < B_{\text{ОТП}}$ схема возвращается в исходное состояние.
3. Исходное состояние ИС – «включено» ($\Phi > \Phi_{\text{СРАБ}}$ и $B = 0$). При приближении к поверхности ИС постоянного магнита с $B \ll B_{\text{ОТП}}$ микросхема переходит в состояние «выключено», при $B = 0$ схема возвращается в исходное состояние.

Все остальные варианты использования цифровой магнитооптической ИС определяются возможным сочетанием пунктов 1–3.

Представляют интерес многоканальные магнитооптические ИС. На рис. 3.72 приведен внешний вид двухканальной магнитооптической микросхемы.

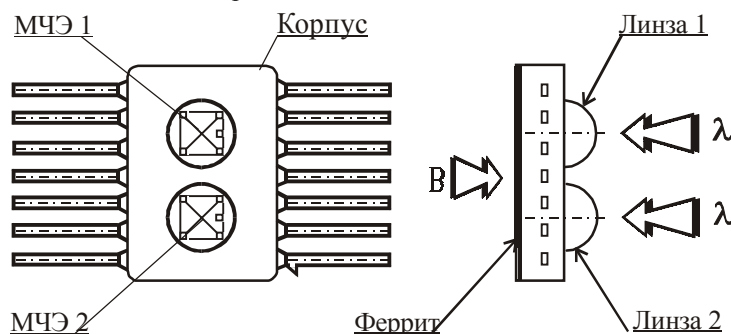


Рис. 3.72. Внешний вид двухканальной магнитооптической микросхемы

Двухканальная магнитооптическая микросхема (рис. 3.72) практически содержит две электрически изолированные ИС, которые размещаются на единой ферромагнитной подложке. Особенностью функционирования такой микросхемы является то, что при использовании потока ИК излучения возможно воздействие его на любой из каналов, в то время как магнитный поток воздействует сразу на оба канала ИС. Принцип работы схемы поясняется на рис. 3.73.

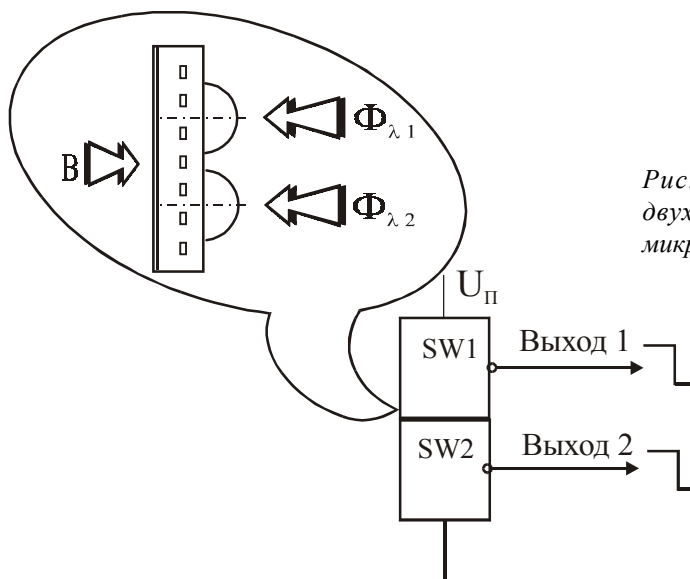


Рис. 3.73. К пояснению принципа работы двухканальной цифровой магнитооптической микросхемы

Возможны следующие варианты использования цифровой двухканальной магнитооптической ИС:

1. Исходное состояние ИС1 и ИС2 – «выключено», $V = 0$. При включении источника ИК излучения ($\Phi_1 > \Phi_{\text{сраб}}$ и $V = 0$) микросхема ИС1 переходит в состояние «включено», при $\Phi_1 < \Phi_{\text{отп}}$ схема возвращается в исходное состояние.
2. Исходное состояние ИС1 и ИС2 – «выключено», $V = 0$. При включении источника ИК излучения ($\Phi_2 > \Phi_{\text{сраб}}$ и $V = 0$) микросхема ИС2 переходит в состояние «включено», при $\Phi_2 < \Phi_{\text{отп}}$ схема возвращается в исходное состояние.
3. Исходное состояние ИС1 и ИС2 – «выключено», $V = 0$. При включении источников ИК излучения ($\Phi_1, \Phi_2 > \Phi_{\text{сраб}}$ и $V = 0$) микросхемы ИС1 и ИС2 переходят в состояние «включено», при $\Phi_1, \Phi_2 < \Phi_{\text{отп}}$ схемы возвращаются в исходное состояние.
4. Исходное состояние ИС1 и ИС2 – «выключено», $V = 0$. При приближении к поверхности ИС постоянного магнита с $V > V_{\text{сраб}}$ ($\Phi = 0$) микросхемы ИС1 и ИС2 переходят в состояние «включено», при $V < V_{\text{отп}}$ схемы возвращаются в исходное состояние.

Все остальные варианты использования цифровой двухканальной магнитооптической ИС определяются возможным сочетанием пунктов 1–4.

Магнитооптические схемы пока не нашли широкого применения. Сведений об их серийном производстве в доступных источниках не обнаружено.

3.4. Перспективы и тенденции развития МЧМС и МУМ

На зарубежном рынке ежегодно появляется до двух десятков новых магнитоуправляемых и магниточувствительных схем. Результаты изучения рынка свидетельствуют о значительном отставании России по уровню параметров, по номенклатуре и по объемам выпуска МУМС.

Анализ тенденций развития зарубежного производства магнитоуправляемых и магниточувствительных микросхем показывает, что в ближайшее десятилетие можно ожидать дальнейшего совершенствования схемотехники и конструкции МУМС и МЧМС с целью повышения уровня магнитоэлектрических параметров и улучшения эксплуатационных характеристик, расширения их функциональных возможностей. При этом совершенствование МУМ, в первую очередь, будет направлено на снижение тока потребления (меньше 0,5 мА), повышение чувствительности (до индукций срабатывания/отпускания ± 1 мТл) и повышения тока коммутации до 3 А и более.

Ожидается дальнейшее повышение степени интеграции МЧЭ с целью увеличения количества магниточувствительных элементов в одном кристалле (и в одном корпусе) до шестнадцати и более. Это приведет к созданию многоканальных магнитоэлектронных устройств и к дальнейшему расширению их областей применения.

Следует ожидать совершенствования технологии изготовления МУМС с переходом на КМОП и КНИ процессы, которые позволят снизить стоимость микросхем до 10–15 центов за штуку. Использование КНИ технологических процессов даст возможность увеличить максимальную рабочую температуру ИС до +200 °С и более при значительном снижении тока потребления и себестоимости изготовления. Кроме того, использование новых технологических процессов позволит уменьшить размер кристалла, а следовательно, корпуса микросхем станут более тонкими и миниатюрными, что приведет к дальнейшему расширению сфер применения МУМС и МЧМС, особенно в автомобильной и автотракторной технике, авиации, металлургии, в военной технике и других областях с жесткими условиями эксплуатации.

Следует ожидать увеличения объемов заказных МУМС и МЧМС на зарубежном рынке, так как зарубежная практика показывает, что разработка новых микросхем для нового магнитоэлектронного устройства часто бывает дешевле и быстрее, чем подгонка этих устройств под стандартные схемы.

Прогнозируемая наработка на отказ современных зарубежных МУМС превышает несколько миллионов часов (отечественных – не более 50000 ч), что стимулирует их использование в устройствах ввода информации ЭВМ и пультах управления ответственной аппаратуры.

Список литературы к главе 3

1. Абдулаев А. Г., Адигезалов Г. Д., Касимов Ф. Д. Высокочувствительная твердотельная магнитокоммутируемая ИС на основе эффекта Холла // Электронные датчики. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – М., ЦНИИ Электроника, 1989. – С.123.
2. Адигезалов М. Н., Касимов Ф. Д., Стоялов М. Н. Высокочувствительная температурностабильная магнитокоммутируемая интегральная схема // Приборы систем управления. – 1990, № 2. – С. 37.
3. Бараночников М. Л., Папу В. В. Микросхемы серии K1116 // Радио, 1990, № 6, – с. 84; № 7, – с. 71–72; № 8, – с. 89.
4. Виг Р., Девей Р. Датчики Холла приобрели широкую популярность: Пер. с англ. статьи из журнала «Sensors», Janiary, 1990, V 7, N 1. – Рр. 32–36.
5. Викулин И. М., Викулина Л. Ф., Стафеев В. И. Гальваномагнитные приборы. – М.: Радио и связь, 1983. – 104 с.
6. Гальперин С. Б. Полупроводниковая магнитоуправляемая интегральная схема МОП ИМС K1. Информационный листок малого научно-технического предприятия «Инсеп», Ленинград, 1989. – 2 с.
7. Дзюбин С. А., Костин В. В., Кривчиков А. М. Аналоговая магниточувствительная интегральная микросхема // Электронные датчики. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – М.: ЦНИИ Электроника, 1989. – С. 125.
8. Интегральный датчик Холла UR1101XP29. Проспект КО «Кристалл». 2000. – 2 с.
9. Интегральный датчик Холла UR1101XP39. Проспект КО «Кристалл». 2000. – 2 с.
10. Интегральный датчик Холла UR1101XP49. Проспект КО «Кристалл». 2000. – 2 с.
11. Кобус А., Тушинский Я. Датчики Холла и магниторезисторы: Пер. с польск. // Под ред. О. К. Хомерики. – М.: Энергия, 1971. – 351 с.
12. Кордич С. Интегральные кремниевые датчики магнитного поля: Пер. с англ. Статья из журнала «Sensors & Actiators». – 1986, № 10, – Рр. 347–378.
13. КФ5116КП1, КФ5116КП3 пороговая магнитоуправляемая ИС с инверсно-соп-ряженными выходами. Проспект ОАО «Ангстрем». 2000. – 2 р.
14. Магниточувствительный элемент с линейным выходом UP1101XP30. Проспект КО «Кристалл», Киев. 2000. – 2 с.
15. Маллер Р., Кейминс Т. Элементы интегральных схем. – М.: Мир, 1989. – 630 с.
16. Микросхемы Холла серии K1116КП. «ГИПЕРОН». – М.: 1991. – 8 с.
17. Микросхемы Холла. Магнитные датчики. Проспект ПО «Гиперон». – М., 1989. – 4 с.
18. Молин Дж., Геске М. Л. Эффект Холла в кремниевых схемах: Пер. с англ. , 1980. – 30 с. /The Hall Effect and its application. 1980. – Рр. 421–445.
19. Осита М. Магнитные датчики: Пер. с японск. // Денси гидзюцу. 1983. Т. 25, № 5. – С.115–120.
20. Прецизионный микроомощный инструментальный усилитель INA-118P. Проспект фирмы «Burr-Brown». 1998. – 7 с.
21. Румени Ч. С., Костев П. Т. Трехполюсный датчик. 1985. – 6 с. Пер.ст. из журнала «L'Academie Bulgare des Sciences Comptes Rendus», 1985, vol. 38, # 9 – Рр. 1144–1148.
22. Шумейкер Ч. Любительские схемы контроля и сигнализации. – М.: Мир, 1989. – 183 с.
23. Baranochnicov M., Krasnikov G., Mordcovich V. Et al. Magnetically Controlled Logic Cell // Uniated States Patent # 5,542,080. Date of Patent: Apr.21.1998.
24. Chopper-Stabilized, precision Hall-effect switch A3240. 1999. – 12 p. (Проспект фирмы «Allegro Microsystems Inc.»).
25. Chopper-Stabilized, precision Hall-effect switch A3240. 1999. – 12 p. (Проспект фирмы «Allegro Microsystems Inc.»).
26. Complementary output power Hall-effect latch. UGN5275K. 1999. – 6 p. (Проспект фирмы «Allegro Microsystems, Inc.»).
27. Complementary output Hall-effect latch UGN3275K. 1999. – 4 p. (Проспект фирмы «Allegro Microsystems, Inc.»).
28. Dual-output Hall-effect switch UGN3235K. 1999. – 8 p. (Проспект фирмы «Allegro Microsystems Inc.»).
29. HAL 800 Programmable Linear Hall Effect Sensor. 1999. – 16 p. (Проспект фирмы «Micronas Intermetall»).
30. HAL320 Differential Hall Effect Sensor IC in CMOS technology. 1999. – 12 p. (Проспект фирмы «Micronas Intermetall»).
31. Hall Effect Transducers. How to apply them as sensors. MICRO SWITCH a Honeywell Division. 1988. – 280 – p.
32. Hall-effect gear-tooth Sensors-AC coupled. UGN/UGS3059KA and UGN/UGS3060KA. 1999. – 8 p. (Проспект фирмы «Allegro Microsystems Inc.»).
33. Hall-effect gear-tooth Sensors-zero speed. A3046EU/LU, A3056EU/LU and A3058EU/LU. 1999. – 8 p. (Проспект фирмы «Allegro Microsystems Inc.»).
34. Hall-effect, direction-detection Sensors. A3421xKA and A3422xKA. 1999. – 12 p. (Проспект фирмы «Allegro Microsystems, Inc.»).

35. Instrumentation Amplifier Application Guide. 2ND Edition. Analog Devices. 1992. – 50 p. (Материал фирмы «Analog Devices»).
36. Linear Output Magnetic Field Sensor AD22151. 1999. – 8 p. (Проспект фирмы «Analog Devices»).
37. MICRO SWITCH. Sensing and Control. Solid State Sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1997.
38. Microelectronic Integrated System. Applications and Databook. «Melexis». 1999. – 116 p.
39. Multiplexed thin-wire Hall-effect Sensor Ics. A3054KU and A3054SU. 1999. – 10 p. (Проспект фирмы «Allegro MicroSystems Inc.»).
40. Power Hall Sensor/Drivers for brushless DC Motors. UDN3625M and UDN3626M. 1999. – 8 p. (Проспект фирмы «Allegro MicroSystems. Inc.»).
41. Precision Single Supply Instrumentation Amplifier. Analog Devices. 1997. – 16 p. (Материал фирмы «Analog Devices»).
42. Solid State Sensors. Position, current, flow, liquid level and temperature sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1989. – С. 4–48.
43. TLE4905G, TLE4935G, TLE4935-2G, TLE4945-2G. Uni- and Bipolar Hall Effect Switches for Magnetic Field Applications. 1998. – 12 p. (Проспект фирмы «Siemens»).
44. TLE4905L, TLE4935L, TLE4935-2L, TLE4945L, TLE4945-2L. Uni- and Bipolar Hall Effect Switches for Magnetic Field Applications. 1998. – 14 p. (Проспект фирмы «Siemens»).
45. Ultra-sensitive bipolar Hall-effect switches. UGN3132, UGN3133. 1999. – 8 p. (Проспект фирмы «Allegro MicroSystems Inc.»).
46. Vig R., Dewey R. Hall Effect Sensor Gain Acceptance // Sensor, January, 1990. – 32 p.

Глава 4. Многоэлементные и многоканальные преобразователи МП

Для создания систем магнитной диагностики и дефектоскопии используются многоканальные магнитоэлектронные устройства.

Основную группу многоканальных МЭУ составляют многоэлементные преобразователи магнитного поля, которые различаются по принципам работы и размещения МЧЭ, по способам их соединения и обработки сигнала.

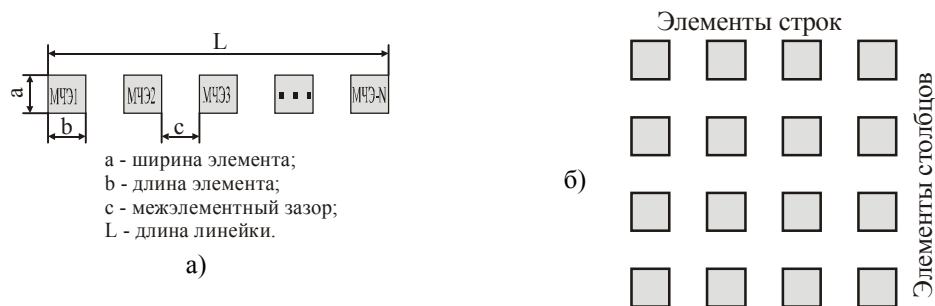


Рис. 4.1. Варианты размещения магниточувствительных элементов: а – линейка; б – матрица

Многоэлементные ПМП делятся на несколько групп по следующим основным признакам:

- **по характеру взаимного расположения магниточувствительных элементов:**
 - линейные (ЛПМП), в которых магниточувствительные элементы располагаются в один ряд (строку), при этом размеры МЧЭ и зазоры между ними могут быть как одинаковыми, так и различными (рис. 4.1.а);
 - матричные (МПМП), в которых МЧЭ располагаются по строкам и столбцам (рис. 4.1.б);
- **по принципу преобразования магнитного поля в электрический сигнал:**
 - мгновенного действия;
 - с частичным накоплением;
 - с полным накоплением;
- **по физическому принципу действия и способу организации отдельных магниточувствительных ячеек:**
 - гальваномангнитные (элементы Холла);
 - магниторезисторные;
 - магнитодиодные;
 - магнитотранзисторные;
 - другие;
- **по принципу коммутации электрического сигнала:**
 - с внешней коммутацией;
 - с полной электрической развязкой отдельных МЧЭ друг от друга;
 - с внутренними электрическими связями между элементами;
 - с внутренней электронной коммутацией;
- **по способу выборки информации:**
 - с параллельной выборкой (информация со всех элементов структуры снимается одновременно по параллельным каналам);
 - с последовательной выборкой (информация снимается поочередно, в соответствии с номером элемента в структуре);
 - со словарной выборкой (информация считывается одновременно со всех элементов выбранной строки);
 - с регистровой выборкой (информация считывается со всех элементов выбранного столбца);
 - с произвольной выборкой (выборка элементов в структуре может производиться по любому, заранее заданному схемой управления закону).

Многоэлементные магнитоэлектронные устройства мгновенного действия

К данной группе относятся многоэлементные магнитоэлектронные устройства (структуры) двух типов: с полной электрической развязкой отдельных элементов и с внутренними электрическими связями между МЧЭ.

Структуры первого типа формируются путем набора их из отдельных магниточувствительных элементов (иногда даже из готовых одноэлементных ПМП) или выделений отдельных МЧЭ на единой подложке методами фотолитографии или прецизионной резки. Между элементами существует полная электрическая развязка.

Каждый элемент имеет свой самостоятельный канал обработки сигнала с регулируемым коэффициентом усиления. В наборной матрице из готовых ПМП (такие матрицы иногда называют «мозаиками») не может быть обеспечена высокая плотность размещения МЧЭ. Однако при необходимости путем индивидуального отбора образцов достигается высокая равномерность параметров для всех элементов матрицы.

Примечание.

Магниточувствительные элементы многоэлементных ПМП монтируются на подложке из немагнитного материала, иначе возникает «магнитная» связь между МЧЭ, что приводит к ухудшению геометрической разрешающей способности аппаратуры.

Для получения максимальной разрешающей способности геометрические размеры МЧЭ и зазоры между ними устанавливаются минимальными.

Общим недостатком структур такого типа является наличие большого числа выводов ($2n$ – число элементов), занимающих большой объем, что накладывает существенные ограничения на количество МЧЭ в структуре, а также длительное время подключения структуры к электронному тракту, особенно при измерении параметров. Реализация такого принципа построения многоэлементных магнитоэлектронных устройств для большого числа МЧЭ при малом шаге между элементами сопряжена со значительными технологическими и схемотехническими трудностями.

Указанными обстоятельствами объясняется то, что число МЧЭ (или каналов) в подобных структурах не превышает нескольких десятков, а это, в сочетании с высокой стоимостью приборов, ограничивает область их применения.

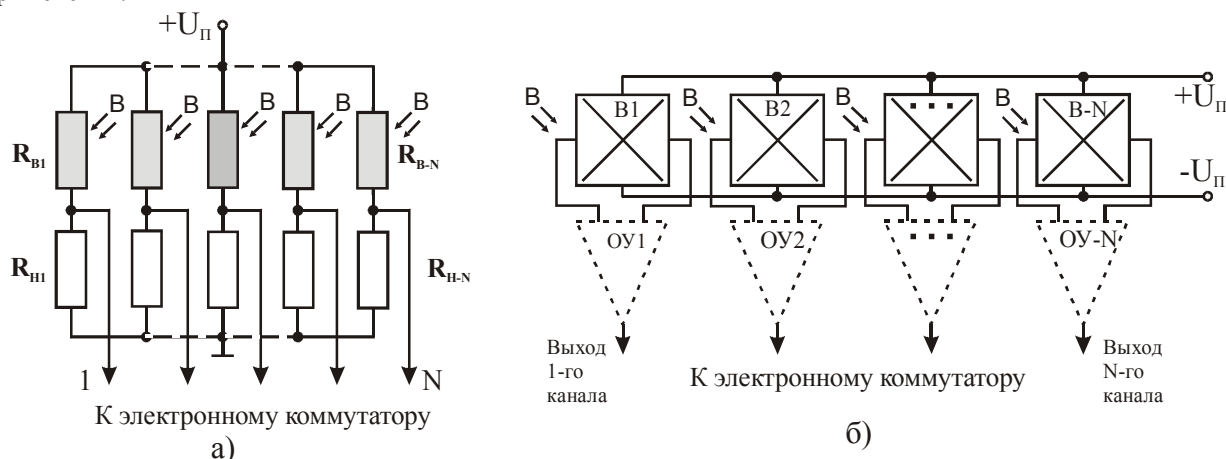


Рис. 4.2. Многоэлементные линейные структуры МЭУ: а – на основе магниторезисторов; б – на основе элементов Холла

Более перспективными с точки зрения практического использования являются линейные и матричные структуры, магниточувствительные элементы в которых по электрическим цепям связаны между собой. Простейшими из этой группы являются устройства, у которых от каждого элемента имеется только по одному выводу, а вторые – объединены. Общее число выводов такой структуры равно $n+1$, где n – число элементов. Эта структура показана на рис. 4.2.

Наибольшее распространение получили матричные многоэлементные структуры с взаимно ортогональными контактными шинами. Примеры матричных многоэлементных структур с различными ПМП приведены на рис. 4.3.

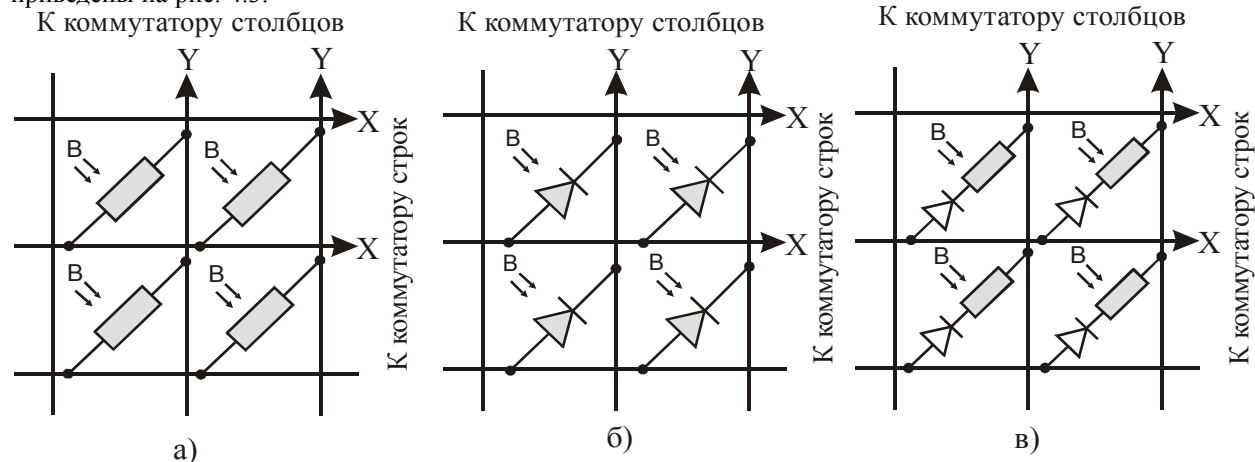


Рис. 4.3. Примеры матричных МЭУ с различными ПМП: а – магниторезисторное; б – магнитодиодное; в – магниторезистор-диодное.

Эти устройства (рис. 2.3) позволяют сократить число внешних коммутационных соединений за счет использования группового параллельного присоединения магниточувствительных элементов к взаимно перпендикулярным токоведущим шинам, где элементы столбцов присоединены к отдельным вертикальным шинам, а элементы строк – к горизонтальным.

Опрос элементов в таких приборах в заданной последовательности осуществляется электрическим способом с помощью вертикального и горизонтального коммутирующих устройств.

Наличие внутренних электрических связей между элементами (если их число в структуре, равно $m \times n$), позволяет при последовательном опросе каждого элемента использовать внешние коммутаторы с числом каналов m и n .

Выигрыш в количестве необходимых коммутируемых каналов по сравнению со структурой с полной электрической развязкой составляет:

$$K = \frac{2 \times (m \times n)}{(m + n)} \quad (4.1)$$

где m и n – соответственно число строк и столбцов.

К недостаткам использования структур с внутренней электрической связью относятся утечки по токоведущим шинам и по подложке, коммутационные переходные процессы и перекрестные связи.

Перекрестные связи, проявляющиеся в наложении сигналов с неопрашиваемых элементов на сигнал с опрашиваемого элемента, приводят к искажению сигнала с опрашиваемого элемента, а иногда и к полной его потере. Это происходит потому, что, хотя источник питания подключается непосредственно к опрашиваемому элементу, через сопротивление нагрузки идет ток не только от опрашиваемого элемента, но и со всех остальных элементов, причем степень вклада в общий ток, проходящий через нагрузку, токов с неопрашиваемых элементов зависит от способа коммутации сигнала.

Магниточувствительные элементы, скомпонованные в многоэлементную матрицу с адресными шинами, могут коммутироваться внешним коммутатором различными способами. На рис. 4.4 приведена функциональная схема магнитопримного устройства на основе магниторезисторной матрицы, на примере которой могут рассматриваться несколько способов внешней коммутации МЧЭ.

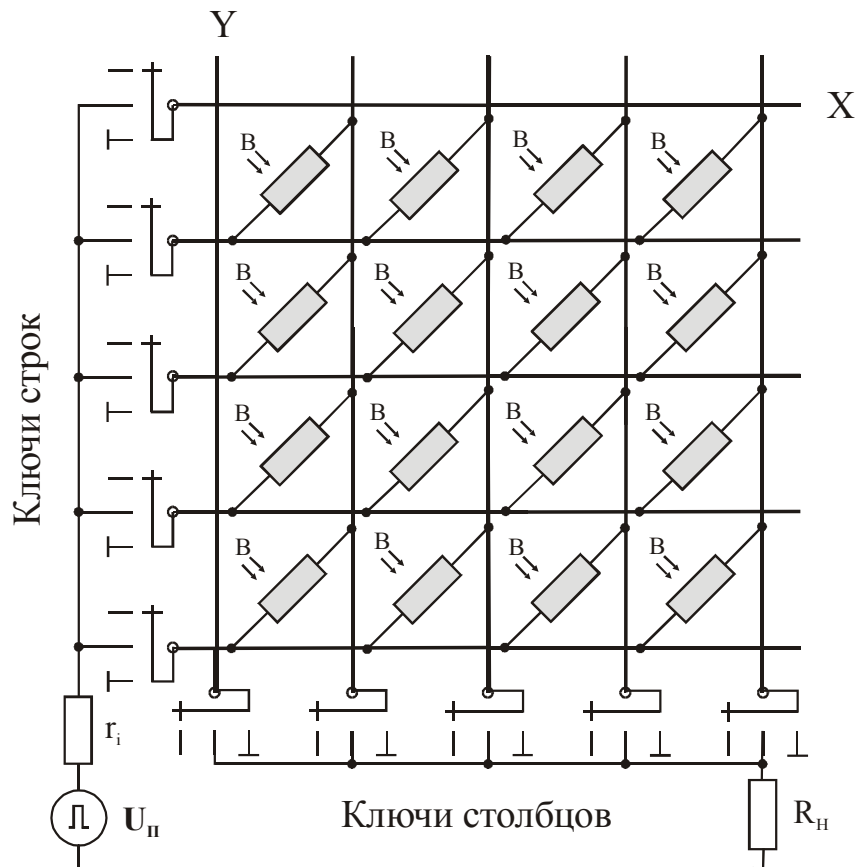


Рис. 4.4. Функциональная схема магнитопримного устройства на основе матрицы магниторезисторов

Необходимые строки и столбцы подключаются к источнику питания с помощью ключевых элементов. (см. рис. 4.4). Поэтому возможны следующие способы коммутации ключей:

- все ключи всех неопрашиваемых элементов разомкнуты, замкнуты только ключи опрашиваемого элемента;
- все ключи свободных от опроса элементов заземлены;
- все столбцовые ключи свободных от опроса элементов заземлены, а строчные – разомкнуты;
- все столбцовые ключи свободных от опроса элементов разомкнуты, а строчные – заземлены.

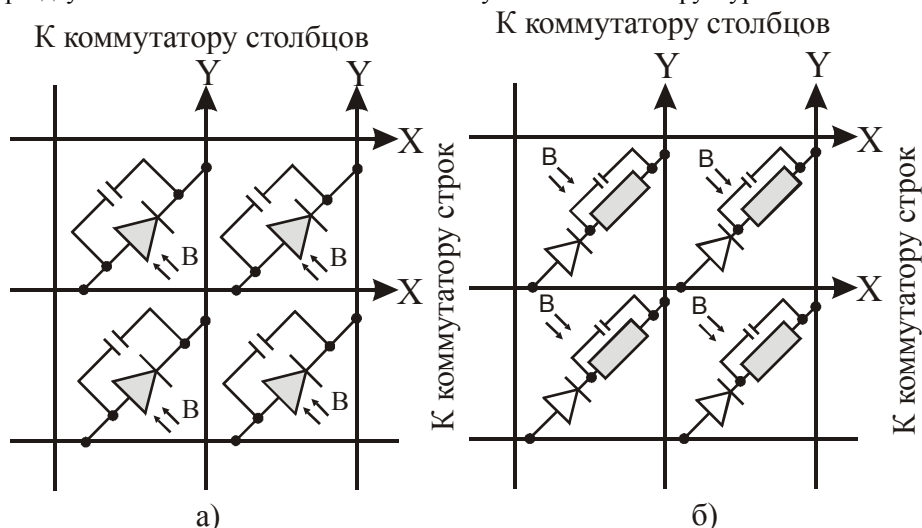
Каждый из предложенных способов имеет достоинства и недостатки, поэтому выбор конкретного способа зависит от условий использования магнитоэлектронного устройства. (Подробнее см. [6]).

Многоэлементные магнитопримемные устройства с накоплением сигнала

Структурам, работающим в режиме мгновенного действия, свойствен низкий уровень сигналов, снимаемых с нагрузки. При воздействии на полезный сигнал перекрестных искажений и фронтов коммутирующих импульсов выделение полезного сигнала в такой структуре без применения специальных схем его обработки становится проблематичным. В этой связи представляют интерес структуры, в которых за время между двумя очередными опросами элемента может осуществляться полное или частичное интегрирование (накопление) установившегося значения электрического сигнала. Принцип действия структур с накоплением заряда основан на использовании процессов заряда и разряда емкости. (Подробнее см. [6]).

Наибольший эффект от использования принципа интегрирования сигнала можно получить в схемах с полным накоплением. Такие схемы реализуются путем использования самого магниточувствительного элемента (например, емкости магнитодиода в структуре магнитодиод–диод либо емкости конденсатора, подключаемого параллельно каждому магниторезистору в структуре магниторезистор–диод или параллельно магнитодиоду). На рис. 4.5. приведены примеры двух типов многоэлементных магниточувствительных структур с накоплением заряда.

Рис. 4.5. Примеры многоэлементных магниточувствительных структур с полным накоплением заряда: а – магнитодиод–диодная; б – магниторезистор–диодная



Принцип действия магниточувствительной структуры типа «магниторезистор–конденсатор–диод» проиллюстрирован схемой, приведенной на рис. 4.6. В данной структуре должна использоваться тонкопленочная магниточувствительная матрица с высоким значением сопротивления МЧЭ ($R_{MR} \gg 10 \text{ кОм}$).

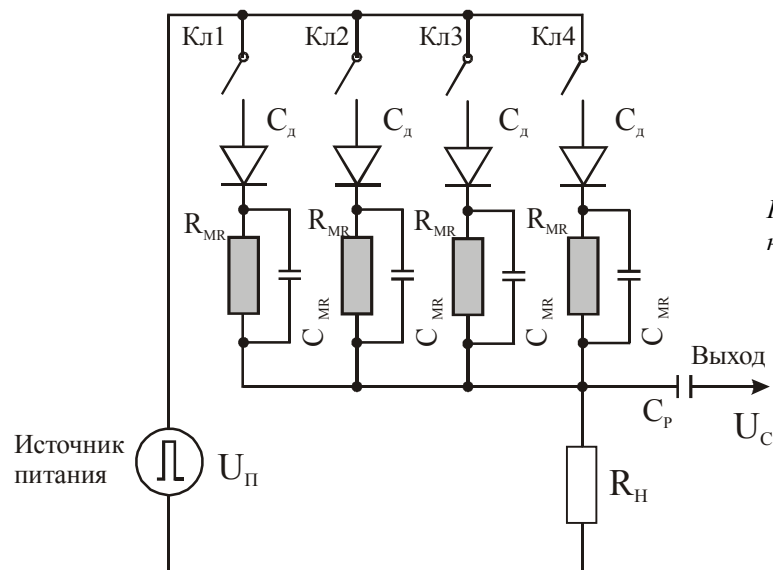


Рис. 4.6. Схема структуры с полным накоплением заряда

Схема (рис. 4.6) работает следующим образом. .

При замыкании ключа Кл через емкость C_{MR} , подключенную параллельно МЧЭ, протекает зарядный ток, заряжающий емкость C_{MR} (при $B = 0$) до напряжения U_{Π} с постоянной времени, равной $\tau_3 = \tau_{д.пр} (C_{MR} + C_d)$, (где $\tau_{д.пр}$ – постоянная времени диода.)

При размыкании ключей Кл емкость C_{MR} разряжается через сопротивление магниточувствительного элемента R_{MR} с постоянной времени, равной $\tau_p = R_{MR} \times C_{MR}$. При этом величина разряда емкости будет равна:

$$\Delta Q_p = \int_0^{T_{нак}} I_p(t) dt \quad (4.2)$$

где $I_p(t)$ – ток разряда;

$T_{нак}$ – время между двумя соседними импульсами опроса, определяемое степенью воздействия на МЧЭ управляющего магнитного поля.

Таким образом, после первого разряда емкости C_{MR} потенциал в магниточувствительной ячейке изменяется на значение, пропорциональное величине индукции управляющего магнитного поля.

При следующем опросе МЧЭ емкость C_{MR} дозаряжается до напряжения источника питания U_{Π} на значение заряда:

$$\Delta Q_3 = \int_0^{T_{\mu}} I_3(t) dt \quad (4.3)$$

где T_{μ} – длительность опрашивающего импульса, причем

$$\Delta Q_3 = \Delta Q_p \int_0^{T_{\mu}} I_3(t) dt \quad (4.4)$$

При этом ток дозаряда $I_3(t)$, зависящий от степени предшествующего разряда, создает на сопротивлении нагрузки R_n напряжение сигнала, в котором заключена информация о средней величине индукции управляющего магнитного поля B за время между соседними импульсами, называемое временем накопления $T_{нак}$. На рис. 4.7. показаны без дополнительных объяснений временные диаграммы процессов, происходящих в структуре с полным накоплением заряда.

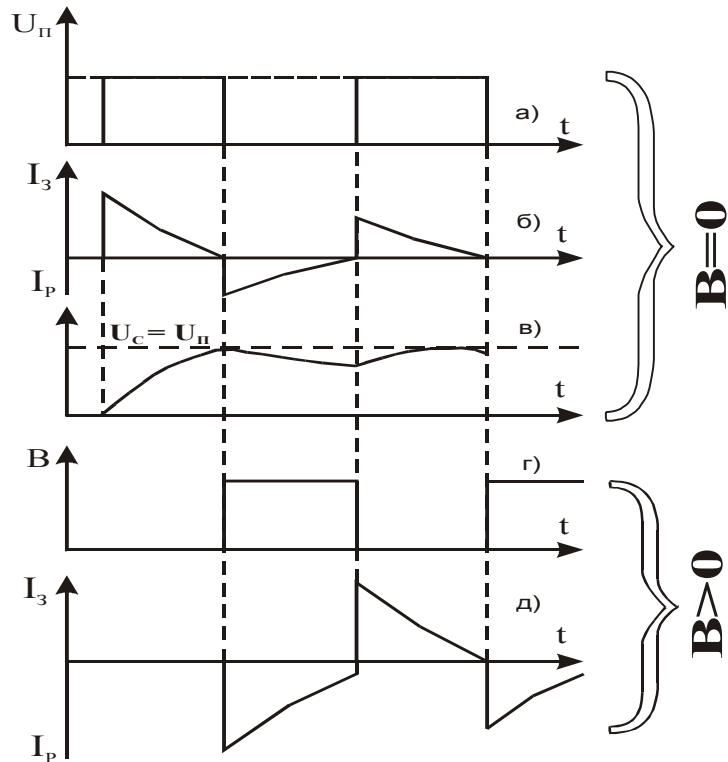


Рис. 4.7. Временные диаграммы процессов, происходящих в структуре с полным накоплением заряда

Из (рис. 4.7) видно, что значение информационного заряда при постоянных параметрах схемы (R_{MR}, C_{MR}), электрическом (U_{II}) и магнитном (B) режимах ее работы определяется временем накопления ($T_{нак}$), удовлетворяющим условию:

$$T_{нак} < \frac{Q_{ш}}{I_0} \quad (4.5)$$

где $Q_{ш}$ – заряд, обусловленный собственными шумами МЧЭ, диода и схемы коммутации;

I_0 – рабочий ток МЧЭ при $B = 0$.

Без промежуточных объяснений укажем, что оптимальное время накопления определяется из условия:

$$T_{нак.опт.} = R_0 \times (C_{MR} + C_D) \times \ln K / (K - 1) \quad (4.6)$$

где K – кратность изменения сопротивления МЧЭ (R_0/R_B).

Импульс тока в нагрузке при опросе элемента определяется по формуле:

$$I_{нак.макс.} = Q_3 / T_{II} + I_{MR} \times T_{нак} / T_{II} \quad (4.7)$$

Это означает, что в данной схеме достигается усиление выходного тока в $T_{нак} / \tau_{II}$ раз по сравнению с усилением схемы мгновенного действия. Степень этого усиления, как следует из выражения (4.6), будет тем больше, чем больше емкость C_M .

(Более подробно см.[6]).

Многослойные и многоканальные магнитоэлектронные устройства пока не нашли широкого распространения. Но по мере совершенствования технологии их изготовления и снижения себестоимости они займут достойное место в ряду приборов, позволяющих значительно расширить сферу применения изделий микромагнитоэлектроники.

Работы по созданию таких приборов проводятся ведущими зарубежными фирмами и институтами России.

В работе [4] дана схема интегральной матричной магниточувствительной структуры (рис. 4.8), разработанной ГНЦ «Технологический центр» (г. Зеленоград). В этой структуре используются двухколлекторные МОП магнитотранзисторы. Опрос МЧЭ осуществляется двумя коммутаторами, размещенными на том же кристалле. Основные параметры прибора приводятся в табл. 4.1.

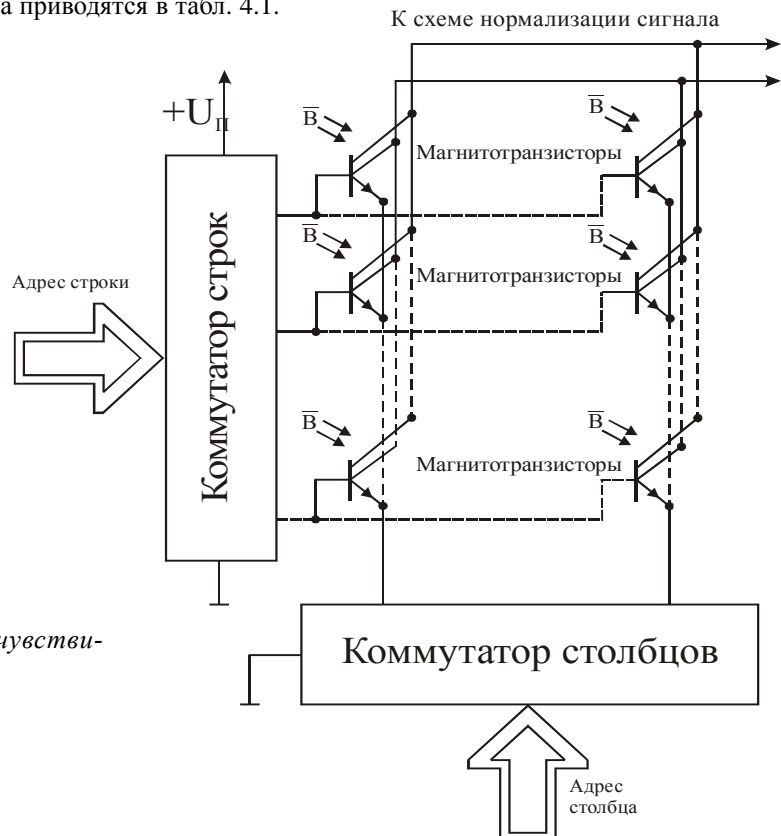


Рис. 4.8. Схема матричной магниточувствительной структуры

Таблица 4.1. Основные параметры интегральной матричной магниточувствительной структуры

№ п/п	Наименование параметра. Единица измерен	Значение параметра
1	Тип магниточувствительного элемента	КМОП-магнитотранзистор
2	Организация	матрица
3	Количество МЧЭ	30 x 30
4	Размер чувствительной зоны, мм ²	10 x 10
5	Геометрическая разрешающая способность, мкм	300
6	Способ коммутации	построчно-координатный
7	Направление регистрируемого магнитного поля	перпендикулярное плоскости МЧЭ

Дополнительную информацию см. в [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Список литературы к главе 4

1. Абакумов А. А. Магнитная интроскопия. – М.: Энергоатомиздат, 1996. – 272 с.
2. Абакумов А. А. (мл.), Амеличев В. В., Галушков А. И., Лебедев В. Л. Исследование интегрального матричного преобразователя магнитного поля на основе МОП магнитотранзисторов. Тезисы докладов IX научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (датчик-97)», г. Гурзуф, 1997.
3. Абакумов А. А. Устройство преобразователей для визуализации магнитных полей. // Дефектоскопия, № 1, 1984.. – С. 3–13.
4. Абакумов А. А., Абакумов А. А. (мл.), Галушков А. И. Перспективы применения матричных полупроводниковых преобразователей магнитного поля в системах слежения за развитием трещин трубопроводов и резервуаров. Тезисы докладов X научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (датчик-98)», г. Гурзуф.
5. Абакумов А. А., Абакумов А. А. (мл.), Чаплыгин Ю. А., Галушков А. И. Оценка погрешностей, калибровка и градуировка полупроводниковых матричных сканеров распределенных магнитных полей. Тезисы докладов VIII научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (датчик-96)», г. Гурзуф, 1996.
6. Аксененко М. Д., Бараночников М. Л., Смолин О. В. Микроэлектронные фотоприемные устройства. – М.: Энергоиздат, 1984. – 208 с.
7. Сухоруков В. В., Вайнберг Э. И., Кажис Р-И. Ю., Абакумов А. А. Неразрушающий контроль // Интроскопия и автоматизация неразрушающего контроля: В 5 кн. / Под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высшая школа., 1993. – Кн. 5. – С. 290–322.
8. Щербинин В. Е., Шлеенков А. С., Булычев О. А., Мизгунов Ю. А. Тонкопленочный матричный преобразователь для систем магнитной микроскопии и томографии. // Материалы XIV Российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика». – М., 1996. – 218 с.

Глава 5. Микроэлектронные магнитные датчики

Датчиком, или первичным преобразователем, называют устройство, осуществляющее восприятие контролируемой величины и преобразование её в величину, удобную для передачи по линиям связи и дальнейшего преобразования.




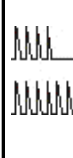

Для понимания принципов действия ниже приведем основные понятия, а также специфические параметры и определения, характерные для датчиков.

Основные характеристики датчиков

Входная величина – величина, воспринимаемая и преобразуемая датчиком.

Выходной сигнал датчика представляет собой определенное изменение несущей величины (тока, напряжения и т.п.), используемое для передачи информации. Изменение (модуляция) несущей величины может осуществляться по амплитуде, по переменному признаку (изменение частоты, длительности воздействия, порядка чередования воздействий), а также по пространственному признаку (чередование сигналов в каналах связи). Классификация электронных датчиков по выходным сигналам приведена в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Классификация электронных датчиков по выходным сигналам

Характеристика сигнала	Виды сигналов									
	Непрерывные по времени					Дискретные во времени				
	Ток		Напряжение			Импульсы постоянного тока (видеоимпульсы) Импульсы переменного тока (радиоимпульсы)				
	Сила постоянного тока	Сила переменного тока	Напряжение постоянного тока	Напряжение переменного тока						
Способ модуляции	По амплитуде			По амплитуде	По частоте	По амплитуде импульса	По длительности импульса	По фазе импульса	По числу импульсов	По комбинации импульсов
Название сигнала Единица измерения	Токовый мА	Токовый мА	Сигнал по напряжению мВ	Сигнал по напряжению	Частотный	Амплитудно-импульсная модуляция (АИМ)	Широтно-импульсная модуляция (ШИМ)	Фазо-импульсная модуляция (ФИМ)	Число-импульсный код	Цифровой код
Примерные количественные характеристики. Вид сигнала.	0...5 0...20 0...100	0...5 0...20 0...100	0...20 0...50 0...100 0..1 000 0...5000 0...10000	0...20 0...50 0...100 0..1 000 0...5000 0...10000	0...100 0...200 1000... 2500 Гц					

Статическая характеристика датчика – функциональная зависимость между изменениями входной X и выходной Y величинами.

Наиболее приемлемой для большинства случаев является линейная характеристика, определяемая зависимостью:

$$Y = S \times X \quad (5.1)$$

где $S = \frac{dY}{dX}$ – называется чувствительностью датчика.

При $S=\infty$ характеристика принимает релейный характер.

Реле можно рассматривать, как частный вид датчика, который характеризуется скачкообразными изменениями выходной величины Y при определенных значениях входной величины $X_{сраб}$ и $X_{отп}$ (см. рис.5.1.б), называемых соответственно параметром срабатывания и отпускания реле.

Отношение $\frac{X_{отп}}{X_{сраб}} = k_B$ – называется коэффициентом возврата,

а разность $X_{сраб} - X_{отп} = \Delta$ - называют дифференциалом реле.

Гистерезисом датчика называется неоднозначность хода его статической характеристики при увеличении или уменьшении входной величины (см. рис. 5.1.).

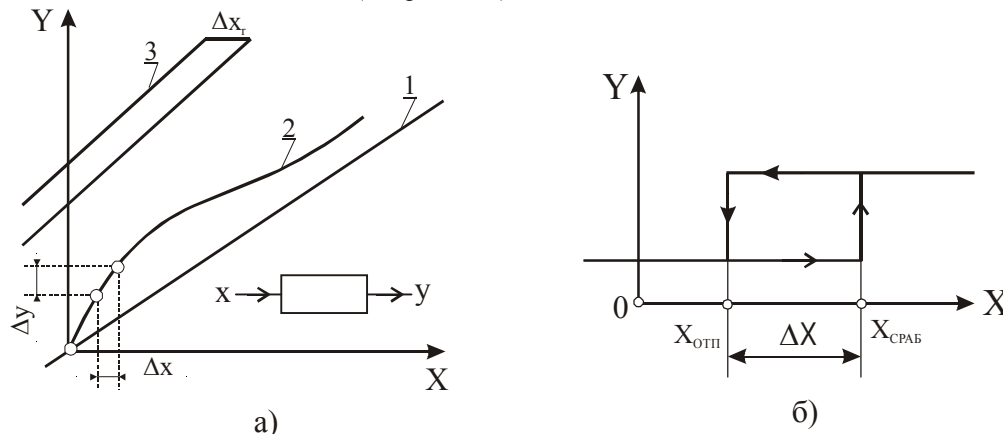


Рис.5.1. К понятию гистерезиса

В общем виде гистерезис выражается в процентах:

$$\Delta_Y = [\Delta X \times (X_{\max} - X_{\min})] \times 100 \quad (5.2)$$

где $X_{\max} - X_{\min}$ - изменение входной величины в рабочих пределах.

Для магнитоуправляемых интегральных схем и магнитных датчиков на их $\hat{\imath}\hat{\imath}\hat{\imath}\hat{\imath}\hat{\imath}$ гистерезис ΔB , определяется как:

$$\Delta B = |B_{сраб} - B_{отп}| \quad (5.3)$$

где $B_{сраб}$ - индукция срабатывания магнитоуправляемой микросхемы, мТл;

$B_{отп}$ - индукция отпускания магнитоуправляемой микросхемы, мТл.

Порог чувствительности датчика определяется как минимальное изменение входной величины, вызывающее изменение выходного сигнала.

Основная погрешность датчика характеризуется максимальной разностью между получаемой величиной выходного сигнала и его номинальным значением, определяемым по статической характеристике для данной входной величины при нормальных условиях. Она выражается как в абсолютных единицах:

$$\sigma_Y = y - y_H \quad (5.4)$$

Так и в относительных. В последнем случае её обычно относят к разности предельных значений выходной величины и выражают в процентах:

$$\sigma_Y = \frac{(\sigma_Y \times 100)}{(y_{\max} - y_{\min})} \quad (5.5)$$

Нормальными условиями эксплуатации датчиков обычно считаются следующие:

- температура окружающей среды $20 \pm 5^\circ\text{C}$;
- атмосферное давление 760 ± 20 мм. рт. ст.;
- относительная влажность окружающего воздуха $60 \pm 20\%$.

Вибрации, паразитные электрические и магнитные поля при этом отсутствуют.

Дополнительные погрешности датчика это погрешности, вызываемые изменением внешних условий по сравнению с их номинальными значениями. Они выражаются обычно в процентах, отнесённых к изменению мешающего фактора на определённую величину (например, температурная погрешность 1,5 % на 10°C ; погрешность от внешнего магнитного поля 0,2 % на 10 мТл и т.д.).

Динамическая характеристика датчика определяет поведение датчика при быстрых изменениях входной величины.

Динамическая характеристика зависит от внутренней структуры датчика и его элементов. Она может быть задана различными методами. Однако наиболее широко используют амплитудно-частотную и фазовую характеристики.

Частотная характеристика это зависимость чувствительности датчика от частоты изменения выходного сигнала.

Фазовая характеристика это зависимость сдвига фаз между векторами входной и выходной величин от частоты синусоидального изменения входной величины.

Общие требования, предъявляемые к датчикам

В зависимости от конкретных условий применения датчиков к ним предъявляются некоторые общие требования. [1]

Ниже приведён примерный перечень этих требований:

- однозначная зависимость выходной величины от входной;
- высокая избирательность; датчик должен реагировать только на изменение той величины, для которой он предназначен;
- минимальное изменение характеристик под влиянием внешних факторов (например, температуры, угла наклона, вибраций и т.п.);
- определенный вид зависимости между выходной и входной величинами;
- высокая чувствительность (отношение приращения выходной величины к приращению входной);
- определенные динамические характеристики (постоянная времени);
- повторимость характеристик (взаимозаменяемость);
- стабильность характеристик во времени;
- устойчивость к химическим воздействиям измеряемой и окружающей сред;
- устойчивость против механических, термических, электрических и т.п. перегрузок;
- взрывобезопасность;
- простота и технологичность конструкции;
- удобство монтажа и обслуживания;
- низкая стоимость при серийном производстве.

Зарубежная классификация микроэлектронных датчиков

Зарубежными производителями используется следующая классификация микроэлектронных датчиков и их составляющих.

Полупроводниковый чувствительный элемент (ПЧЭ) датчика считается основным элементом, выполняющим функцию преобразователя управляющего магнитного поля в электрический сигнал.

ПЧЭ наиболее хорошо приспособлены к массовому производству, однако они не имеют определённых метрологических характеристик.

Первичный преобразователь (ПП) (Sensor) представляет собой ПЧЭ, закрепленный в корпусе, без каких либо внешних элементов коррекции и обработки сигнала. ПП обладает полным набором метрологических характеристик, но все они индивидуальны, а их разброс достигает: по величине чувствительности $\pm 50\%$; начального выходного сигнала $\pm 20\%$ от диапазона выходного сигнала; по температурному дрейфу нуля $\pm 5\%$, а дрейфу чувствительности $\pm 10\%$.

Унифицированный первичный преобразователь (УПП) (Transducer) включает ПП и элементы балансировки, настройки и коррекции характеристик (как правило, пассивные). УПП одной модели имеют близкие характеристики и могут быть с известной степенью точности взаимозаменяемыми.

В некоторых случаях термин Transducer применяют к полностью унифицированным датчикам с выходным сигналом в виде напряжения.

Датчик (Transducer) имеет полностью унифицированные метрологические характеристики и обычно токовый выходной сигнал дистанционной передачи, что достигается добавлением к ПП (или УПП) электронного преобразователя и проведения индивидуальной настройки датчика. Такая настройка составляет 60...70% трудоемкости изготовления датчиков и резко ограничивает возможность полной автоматизации их производства.

Вместо термина датчик (sensor) предпочтительным является использование термина «микроэлектронный датчик».

Зарубежными производителями отмечается, что датчики, изготавливаемые с использованием технологии микроэлектроники, отличаются большим разнообразием метрологических и эксплуатационных характеристик. Отличительной чертой массового производства таких датчиков является неизбежный технологический разброс характеристик, и, как правило, большие дополнительные погрешности. [25]

Интегральные полупроводниковые сенсоры

Всемерное развитие технологических процессов микроэлектроники привело к созданию полностью интегральных полупроводниковых приборов получивших наименование «**Интегральные полупроводниковые сенсоры**» (ИПС).

Интегральные полупроводниковые сенсоры представляют собой отдельный класс твердотельных датчиков, чья основная особенность – конструктивно-технологическая и функциональная интеграция различных элементов измерительного канала на одном полупроводниковом кристалле («чипе») с использованием микро- и нанотехнологий.

Простые ИПС, как правило, содержат на чипе один чувствительный элемент (первичный преобразователь) и простейшие элементы вторичного преобразования (мостовые схемы, преобразователи сопротивления, предусилители и т.п.) и используются для преобразования какой-либо одной физической величины в электрический сигнал. Их можно отнести к разряду интегральных микросхем низкой и средней степени интеграции.

Сложные ИПС – могут содержать на чипе несколько чувствительных преобразующих элементов (ЧЭ), различные элементы вторичного преобразования (усилители, коммутаторы, преобразователи типа «напряжения-частота», АЦП и др.), устройства обработки и хранения данных (компараторы, счетчики, сумматоры, перемножители, схемы памяти, процессоры) и актуаторные элементы.

Сложные ИПС относятся к разряду интегральных микросхем средней и высокой степени интеграции. ИПС с большим количеством однородных чувствительных элементов (например, матричных структур магниточувствительных элементов) – называются **сенсорами матричного типа**.

Устройства, способные выполнять функции измерения и контроля нескольких физических величин, автоматического переключения каналов и коррекции систематических погрешностей, адаптации к изменению эксплуатационных условий, вычислений, сравнений, принятия решений и формирования соответствующих сигналов, называют **интеллектуальными сенсорами**.

Магнитные ИПС представляют отдельную большую группу сложных интегральных полупроводниковых сенсоров для построения которых типовыми элементами являются интегральные преобразователи Холла, 2-х коллекторные транзисторы, а также усилители и ключи на биполярных и КМОП транзисторах и т.д.

Большинство серийно выпускаемых сенсоров являются **простыми ИПС**.

В них, как кажется на первый взгляд, мало проявляются преимущества интеграции элементов, поскольку для создания приборов и систем к простым интегральным сенсорам, как и к дискретным, все равно приходится подключать устройства интерфейсной электроники, а невысокая стоимость чипов часто подавляется относительно высокой стоимостью корпусов датчика или прибора.

К преимуществам ИПС можно отнести следующее:

- малые габариты, масса, потребляемая мощность, тепловая инертность, разброс геометрических и электрофизических параметров элементов;
- высокая воспроизводимость элементов;
- возможность внутренней и автоматической компенсации систематических погрешностей;
- возможность унификации выходных сигналов по типу и по величине для устройства сопряжения с устройствами обработки и отображения данных;
- технологическая совместимость с типовыми элементами ИМС;
- возможность создания новых типов сенсоров и микросистем, которые принципиально не могут быть изготовлены по другим технологиям.[20]

5.1.Магнитные датчики для регистрации перемещений

Магнитные датчики для регистрации перемещений контролируемых объектов относятся к, т.н. функционально-ориентированным магнитным датчикам, которые составляют основную группу магнитоэлектронных приборов.

Функционально-ориентированный магнитный датчик – это специально сконструированное магнитоэлектронное устройство, предназначенное для решения узкого круга задач. Например, для регистрации перемещений или контроля скорости вращения контролируемого объекта, угла наклона и т.п.

Магнитные датчики перемещения (МДП) являются наиболее универсальными магнитоэлектронными устройствами, поскольку они используются и как самостоятельные датчики, и как составные элементы многих других более сложных датчиков.

Некоторые датчики содержат специальные элементы, преобразующие давление управляющего элемента (например, поводка, штока и др.) в перемещение, и выходные преобразователи магнитного поля, преобразующие перемещение в выходной сигнал. Аналогичное устройство имеют многие датчики уровня, расхода и температуры.

Датчики перемещения находят широкое применение в различных областях науки, техники и в производстве, в том числе, в металлообрабатывающем оборудовании с программным управлением, различного вида транспортерах, роботах и микророботах, подъемных механизмах, поточных линиях с автоматизированным управлением, в бытовой технике и аппаратуре и т.п.

Кроме того, датчики перемещения используются как нулевые органы датчиков с силовой компенсацией и в других устройствах.производстве. В том числе, в металлообрабатывающем оборудовании с программным управлением, различного вида транспортерах, роботах и микророботах, подъёмных механизмах, поточных линиях с автоматизированным управлением, в бытовой технике и аппаратуре и т.п.

Отличительные особенности магнитных датчиков перемещения:

- высокая надежность работы при относительной простоте конструкции и электрической схемы;
- отсутствие механического контакта между перемещающейся деталью и датчиком;
- высокая точность фиксации положения;
- высокая разрешающая способность и низкий порог чувствительности;
- возможность эксплуатации в условиях агрессивной окружающей среды;
- низкая потребляемая мощность;
- малые габариты,
- большой срок службы;
- низкая стоимость и пр.

На рис. 5.2. приведена классификация датчиков перемещения по характеру связи с объектом и виду выходного сигнала, предложенная М. Феррети [26]

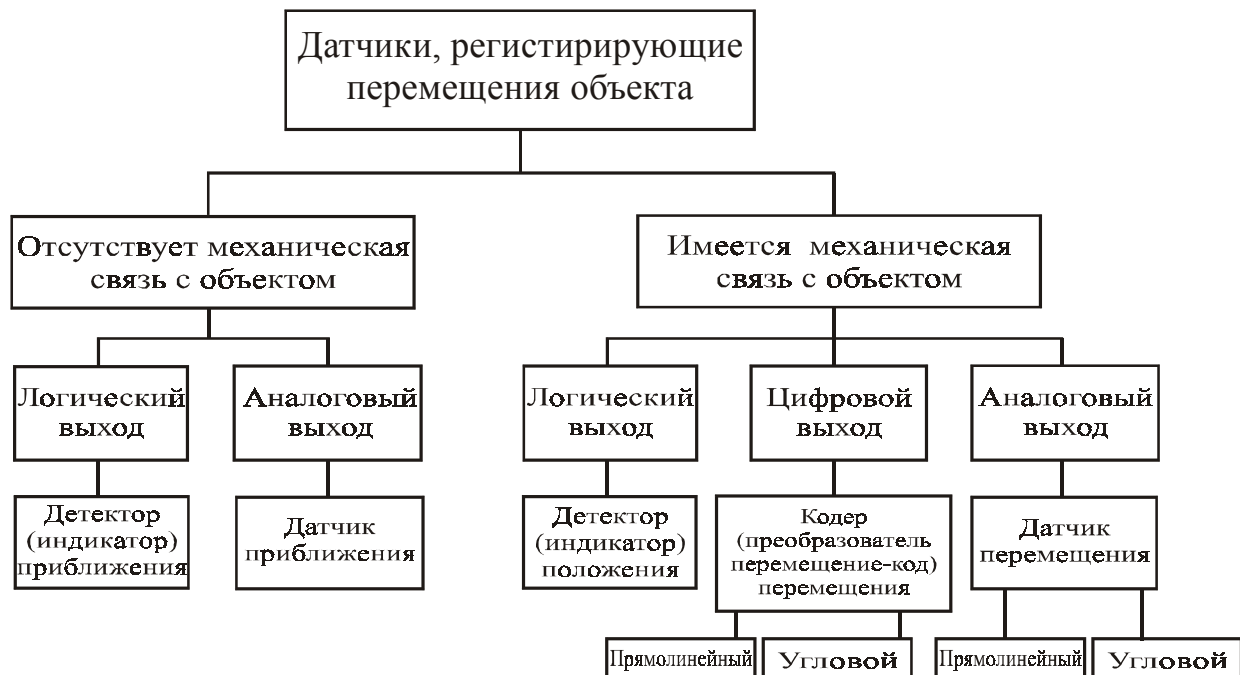


Рис. 5.2. Классификация датчиков по характеру связи с объектом и виду выходного сигнала

Характер взаимодействия МЧЭ датчиков с управляющим магнитным полем

Все магнитные датчики имеют одно общее свойство – их магниточувствительные элементы взаимодействуют с полем постоянного магнита (ПМ) и ферромагнитными элементами объектов контроля. Характер взаимодействия с ПМ и реакция датчиков типичны для абсолютного большинства видов преобразователей магнитного поля.

Для пояснения принципов работы датчиков, использующих постоянные магниты, на рис.5.3...5.7 приведены без подробных разъяснений наиболее часто встречающиеся схемы и характер взаимодействия ПМ с МЧЭ. [37]

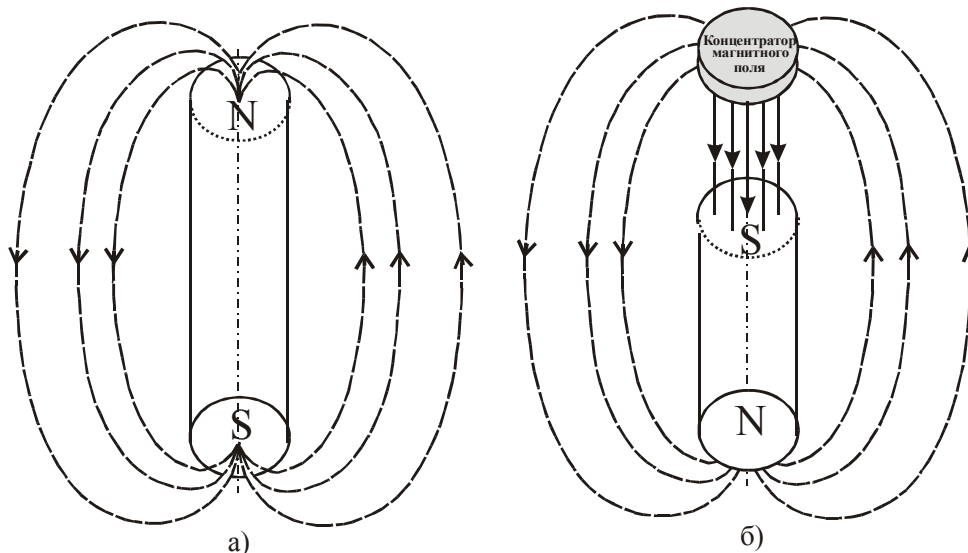


Рис. 5.3. Распределение поля рассеяния постоянного магнита (а), и влияние концентратора - (б)
На рис. 5.4. приведена зависимость магнитной индукции от расстояния до магнита.

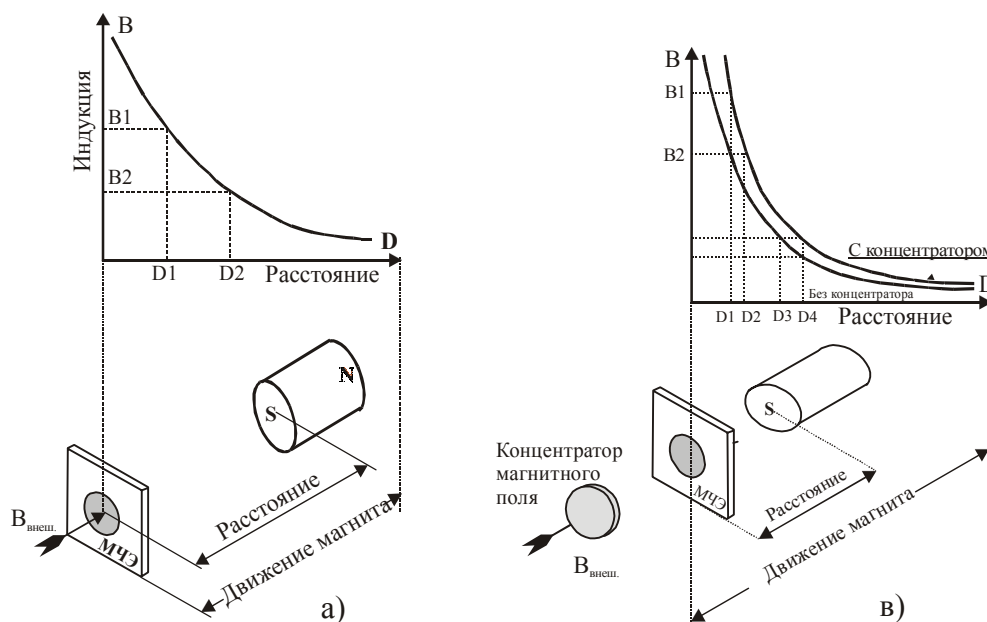


Рис. 5.4. Зависимость индукции ПМ от расстояния до МЧЭ (а), и при использовании концентратора магнитного поля - (б)

В случае, изображенном на рис.5.4.а, однополюсный магнит приближается перпендикулярно поверхности магниточувствительного элемента. Зависимость $B=F(D)$ имеет гиперболический характер. С определенной степенью приближения можно утверждать, что $B \sim 1/D^2$.

При использовании простейшего концентратора магнитного поля (например, тонкой пластины из пермаллоя или феррита) гиперболическая кривая $B=F(D)$ смещается параллельно вверх. (См. рис. 5.4.б.)

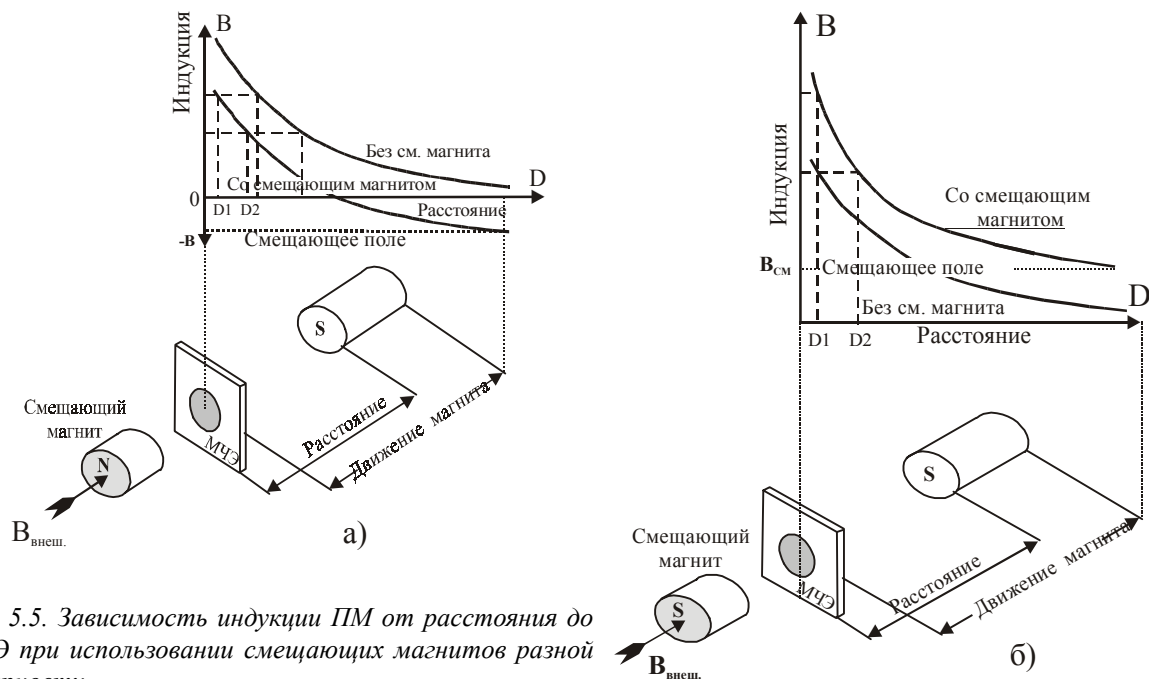


Рис. 5.5. Зависимость индукции ПМ от расстояния до МЧЭ при использовании смещающих магнитов разной полярности

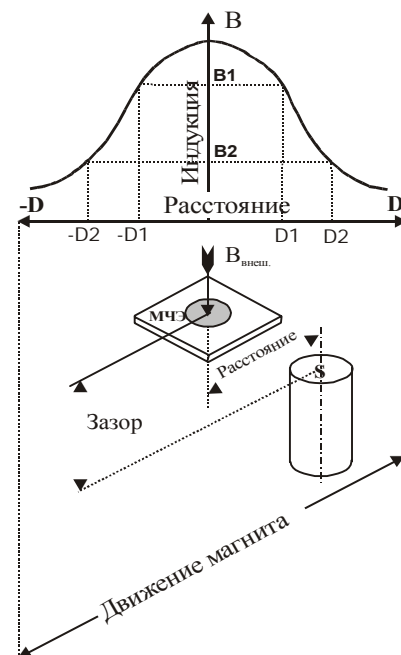
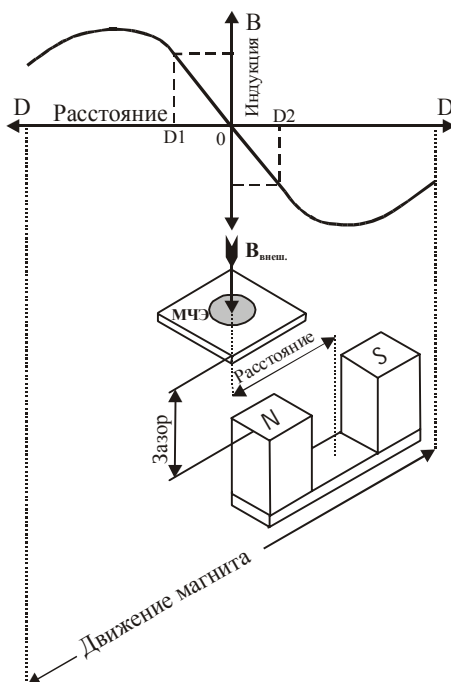
При проектировании аналоговых магнитоэлектронных приборов обычно используют короткий квазилинейный участок характеристики D1-D2 или применяют специальную схему, вычисляющую функцию « $1/D$ ». В зависимости от параметров ПМ и ПМП линейный участок может лежать в диапазоне от 1 до 50 мм.

При использовании смещающих магнитов разной полярности кривые $B=F(D)$ принимают вид, приведенный на рис. 5.5.а,б.

Рис. 5.6. Зависимость индукции магнитного поля при боковом перемещении ПМ

На рис. 5.6. приведена зависимость индукции магнитного поля при боковом перемещении ПМ.

При боковом перемещении постоянного магнита и сохранении постоянным зазора, на МЧЭ воздействует магнитное поле с положительным направлением потока в случае лежащего напротив «южного» полюса, и с отрицательным - в случае «северного» магнитного полюса.



На рис. 5.7. приведена зависимость индукции магнитного поля при параллельном перемещении двухполюсного и трехполюсного магнитов.

Рис. 5.7.а. Зависимость магнитной индукции при параллельном перемещении двухполюсного магнита с зазором

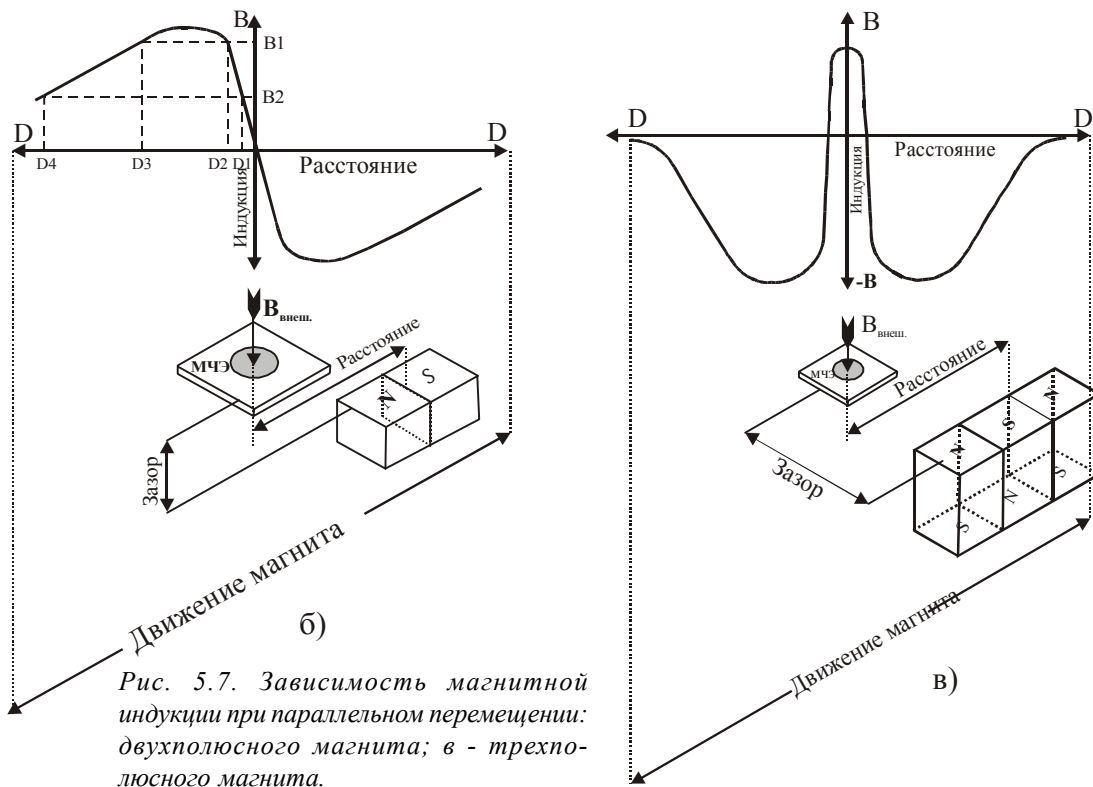


Рис. 5.7. Зависимость магнитной индукции при параллельном перемещении: б) - двухполюсного магнита; в) - трехполюсного магнита.

Принцип действия и конструкции магнитных датчиков перемещения

Принцип действия магнитных датчиков перемещения (МДП) основан на изменении электрического сигнала на выходе МДП при изменении положения контролируемого объекта. Так как чувствительным элементом датчика перемещения является преобразователь магнитного поля, то изменение выходного сигнала фиксирует изменение величины индукции магнитного поля, воздействующего на магниточувствительный элемент МДП.

Основные характеристики магнитных датчиков определяются параметрами используемых ПМП и магнитной системы.

Несмотря на большое различие последних, все они могут быть разбиты на две основные группы:

- датчики с разомкнутой магнитной системой;
- датчики с замкнутой магнитной системой.

Датчики с разомкнутой магнитной системой представляют собой устройства, управление которыми осуществляется при помощи магнитных шунтов, закорачивающих магнитное поле, сформированное встроенным постоянным магнитом. В качестве шунта обычно используется перемещающаяся ферромагнитная деталь, установленная на объекте контроля.

Вариант конструкции разомкнутой магнитной системы схематически приведен на рис. 5.8. На одном из полюсов постоянного магнита 1 находится полюсной наконечник 2 с преобразователем магнитного поля 3. При перемещении ферромагнитной детали 4 вблизи полюсного наконечника 2 усиливается магнитный поток на полюсном наконечнике, приводящий к изменению сигнала на МЧЭ. [11]

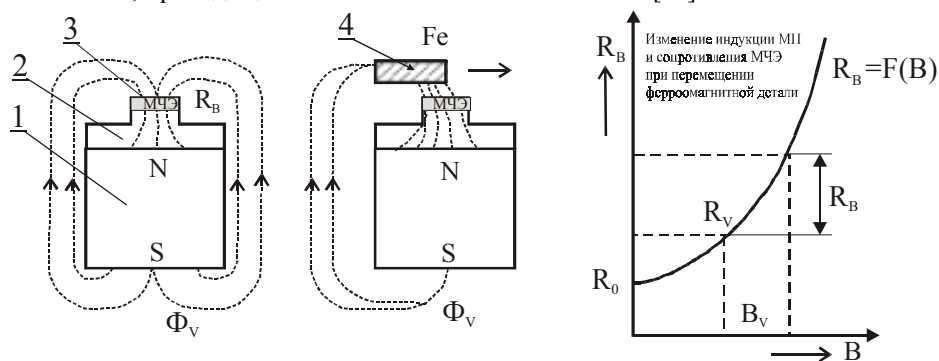


Рис. 5.8. Разомкнутая магнитная система датчика перемещения: 1 - постоянный магнит; 2- магнитопровод; 3- магниточувствительный элемент (магниторезистор); 4 - ферромагнитная подвижная деталь

Датчики с замкнутой магнитной системой (рис. 5.9) представляют собой устройства, управление которыми осуществляется при помощи перемещающихся постоянных магнитов, установленных на объекте контроля.

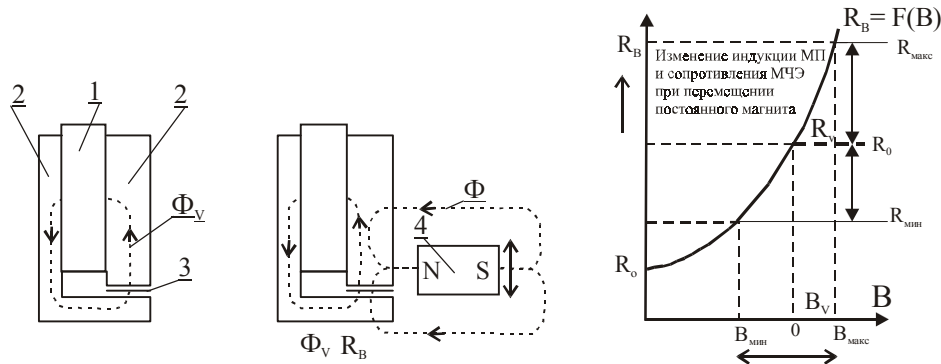


Рис. 5.9. Замкнутая магнитная система датчика перемещения: 1 - постоянный магнит; 2- магнитопровод; 3-магниточувствительный элемент (магниторезистор); 4 - постоянный магнит на подвижной детали

Вариант конструкции замкнутой магнитной системы схематически показан на рис. 5.9. При перемещении подвижной детали с закрепленным на ней постоянным магнитом 4 вблизи воздушного зазора, в котором помещен ПМП, магнитный поток, пронизывающий плоскость МЧЭ, сначала уменьшается, а затем увеличивается. Если постоянный магнит 4 перемещать не сверху вниз, а, наоборот, снизу вверх, то магнитный поток, пронизывающий МЧЭ, будет сначала возрастать, а затем убывать.

Это свойство может быть использовано для определения направления перемещения подвижной детали.

При проектировании датчиков линейного перемещения используют зависимости $B=F(D)$, приведенные на рис.5.4...5.7. При этом в качестве магниточувствительных элементов используется широкий круг дискретных ПМП (например, элементы Холла, магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы) или магниточувствительные микросхемы на их основе.

При использовании зависимости, приведенной на рис.5.3.а когда однополюсный магнит приближается перпендикулярно поверхности датчика, гиперболическую кривую плотности магнитного потока можно линеаризовать путем выбора короткого отрезка кривой или путем подключения к датчику схемы, вычисляющей значение « $1/X$ ». В зависимости от величины индукции магнита измеряемый путь может лежать в диапазоне от 2 до 30 мм.

При использовании всего диапазона положительных и отрицательных значений плотности магнитного потока в процессе, так называемого двухполюсного аксиального приближения, (рис. 5.7.а) получается приблизительно линейная кривая плотности магнитного потока. В этом случае два связанных друг с другом одноименных магнита, расположенных на некотором расстоянии друг от друга, аксиально движутся к поверхности датчика. Датчик линейного перемещения может располагаться в воздушном зазоре и в среднем положении не подвергается воздействию магнитного поля (плотность магнитного поля равна нулю), так как два противоположно направленных магнитных поля взаимно уничтожаются. При сдвиге магнита в одну из сторон начинает преобладать положительная или отрицательная составляющая магнитного поля.

Указанный характер взаимодействия (рис. 5.7.а) отличается хорошей линейностью и позволяет при помощи магнитов соответствующей длины производить измерение расстояний до 200 мм. [27]

Следует иметь в виду, что в обоих типах магнитных система преобразователь магнитного поля имеет начальное магнитное смещение. Это важно для случая использования в качестве ПМП магнитодиодов и магниторезисторов, так как появляется возможность повышения чувствительности датчика.

Варианты конструктивного оформления датчиков перемещения

Простейший датчик перемещения (рис. 5.10) содержит только один из дискретных магниточувствительных элементов (например, элемент Холла, магниторезистор, магнитотранзистор, магнитотиристор, магнитодиод и т.п.), размещенных в специальном защитном корпусе, как правило, из немагнитного материала (алюминий, латунь, пластмасса, керамика и пр.). В случае необходимости в том же корпусе может размещаться миниатюрный постоянный магнит (рис. 5.11).

При этом следует отметить, что все основные параметры таких датчиков полностью определяются параметрами МЧЭ.

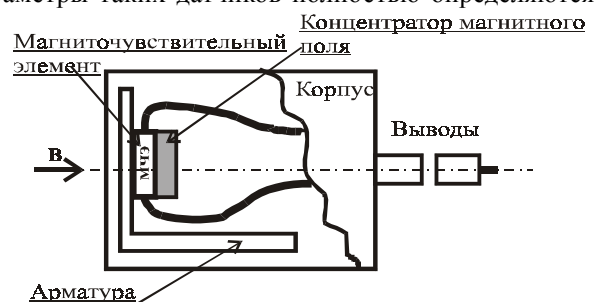


Рис. 5.10. Устройство датчика перемещения с разомкнутой магнитной системой

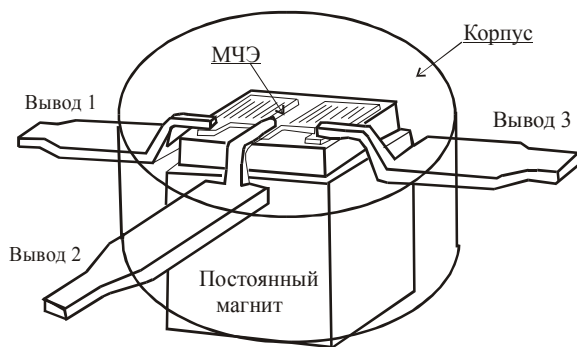


Рис. 5.11. Устройство датчика перемещения с встроенным постоянным магнитом

«Сложный» датчик перемещения (рис. 5.12), кроме ПМП и магнита содержит ещё электронную схему усиления и обработки сигнала, а также встроенный источник питания, (например, стабилизатор напряжения).

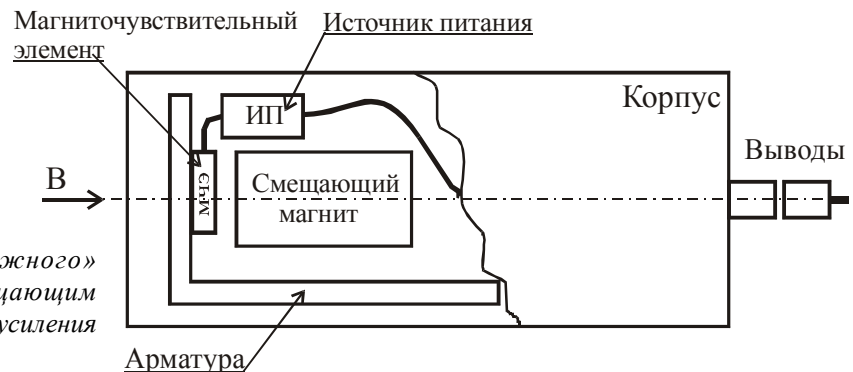


Рис. 5. 12. Устройство «сложного» датчика перемещения со смещающим магнитом и электронной схемой усиления и обработки сигнала.

5.1.2. Магнитные датчики линейного перемещения

Датчики линейного перемещения (ДЛП) предназначены для преобразования линейного перемещения объекта контроля в выходной электрический сигнал, пропорциональный этому перемещению.

Основное требования к датчикам линейного перемещения - это **линейная** зависимость выходного сигнала от расстояния перемещения.

Принцип работы датчиков линейного перемещения поясняется на рис. 5.13.

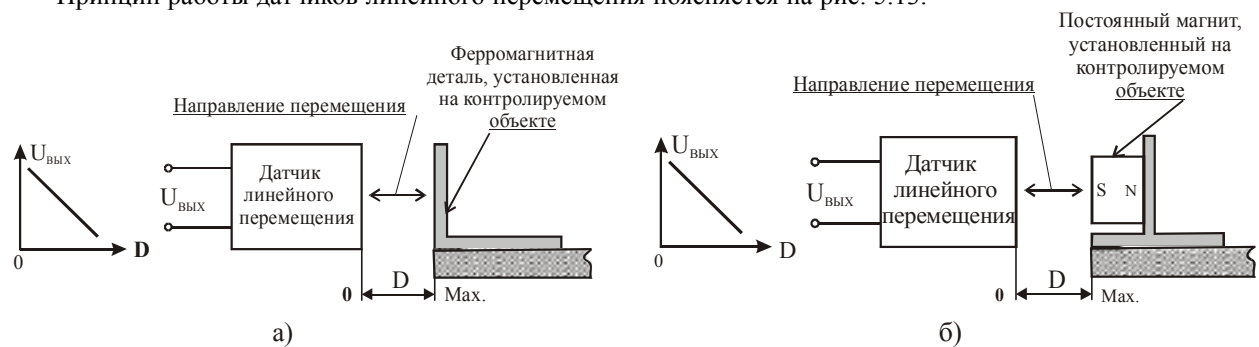


Рис.5. 13. Принцип работы датчиков линейного перемещения: а- с замкнутой и б- с разомкнутой магнитной системой

Примеры технической реализации датчиков линейного перемещения

Датчики линейного перемещения на основе магниторезисторов

Магниторезисторы используются для изготовления магнитных датчиков линейного перемещения, обладающих повышенной точностью. Такие датчики, как правило, имеют небольшую длину рабочего хода.

Для создания таких датчиков используют миниатюрные магнитные системы, характеризующиеся определенным законом изменения магнитного поля. На рис. 5.14. приведены возможные конструкции замкнутых магнитных систем датчиков линейного перемещения на магниторезисторах.

Это достигается путем создания специальной формы воздушного зазора, в котором перемещается магниторезистор (рис. 5.14.а), или использованием др. конструктивных решений. Магниторезистор при этом жестко связан с приводным механизмом датчика (штоком, поводком и т.п.).

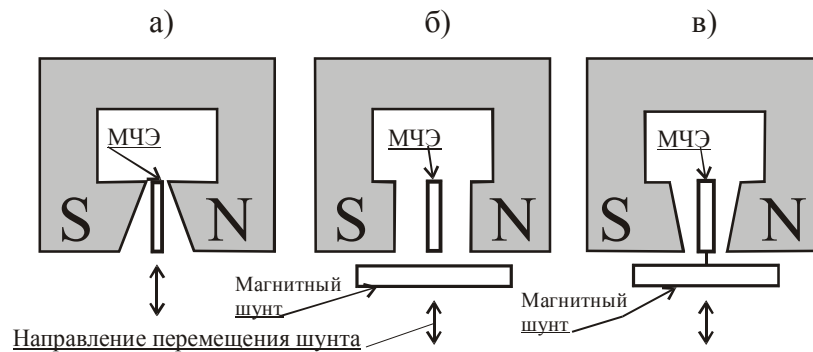


Рис. 5.14. Варианты конструкций магнитных систем датчиков перемещения на магниторезисторах

В конструкции ДПП, схематически показанного на рис. 5.14.б, магниторезистор зафиксирован в воздушном зазоре магнитной системы, а требуемый закон изменения сопротивления обеспечивается за счет применения подвижного магнитного шунта, который жестко связан с приводным механизмом.

Если необходимо получить более резкую зависимость сопротивления от перемещения объекта, используют конструкцию, представленную на рис. 5.14.в. В ней сочетаются специальная форма воздушного зазора магнитной цепи с использованием подвижного магнитного шунта. При нажатии, например, на шток приводного механизма датчика такой конструкции перемещаются магниторезистор и магнитный шунт. Напряженность магнитного поля быстро падает и сопротивление МЧЭ изменяется.

На рис. 5.15 показаны замкнутая магнитная система датчика перемещения, спроектированного по схеме рис. 5.15.а и зависимость сопротивления магниторезистора (R_B) от расстояния d . В этом датчике применен магниторезистор типа СМ4-1. Датчик предназначен для точного контроля малых перемещений. Выходная характеристика датчика отличается хорошей линейностью. [11]

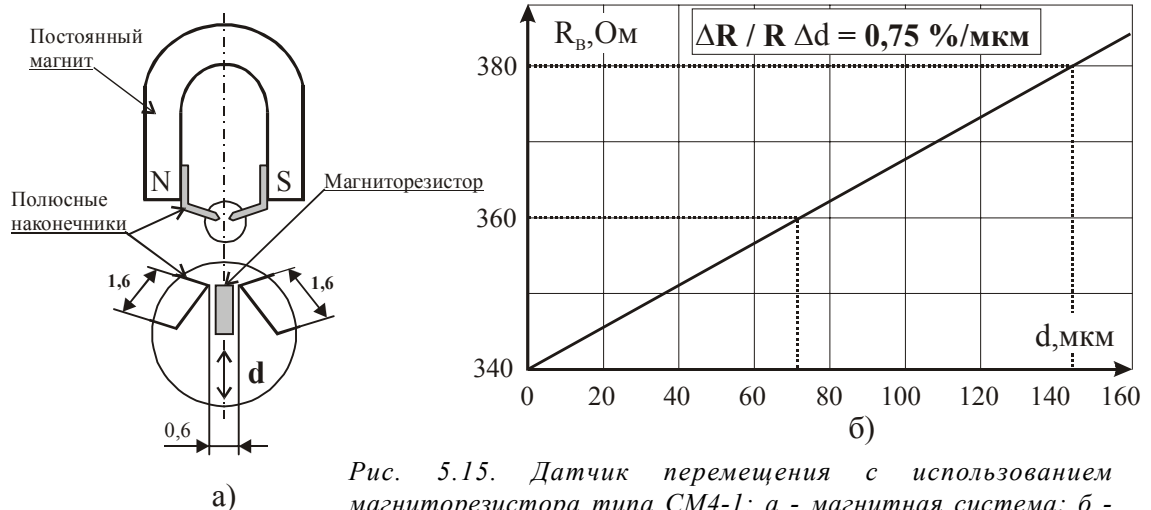


Рис. 5.15. Датчик перемещения с использованием магниторезистора типа СМ4-1: а - магнитная система; б - выходная характеристика

5.1.3. Магнитные датчики приближения

Датчиками приближения принято называть устройства, назначение которых состоит в выдаче выходного сигнала («0» или «1») в том случае, если какая-либо перемещающаяся деталь контролируемого объекта достигнет определенного, наперед заданного положения ($D_{сраб}$). Часто такие датчики называют датчиками конечного положения (ДКП), а также датчиками близости.

В общем виде датчики приближения состоят из магнитной системы и преобразователя магнитного поля в комплекте со схемой усиления и обработки сигнала ПМП. Принцип действия таких устройств основан на возникновении электрического сигнала («0» или «1») на выходе датчика при воздействии на него магнитного поля определенной интенсивности.

Так как напряженность магнитного поля определяется положением перемещающейся детали, то при приближении ферромагнитной детали контролируемого объекта ближе расстояния, равного $D_{сраб}$ происходит срабатывание датчика. При удалении детали на расстояние, равное $D_{отп}$ датчик возвращается в исходное состояние.

Принцип работы датчиков поясняется на рис. 5.16.

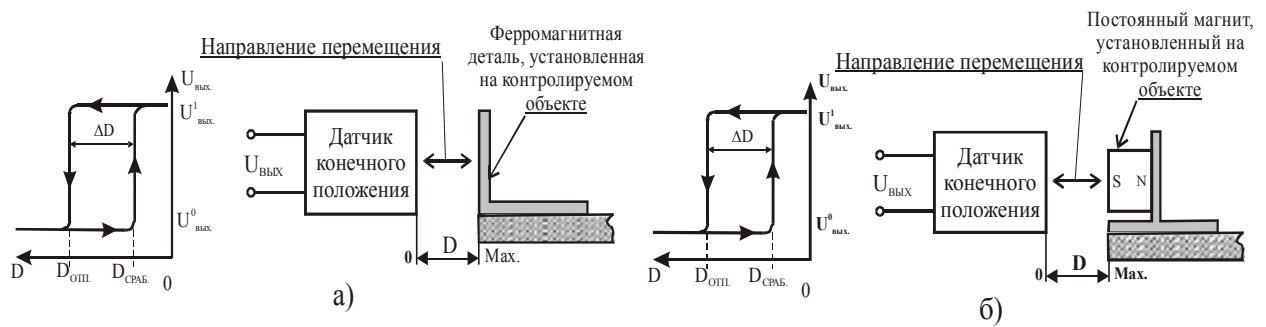


Рис. 5.16. Принцип работы датчиков приближения: а- с замкнутой и б- с разомкнутой магнитной системой

Примеры технической реализации датчиков приближения

Датчики приближения на основе магниторезисторов

На рис. 5.17. показаны магнитная система датчика приближения, спроектированного по схеме рис. 5.14.6 и его выходная характеристика при использовании в качестве МЧЭ – магниторезистора типа СМ4-1. Характеристика имеет нелинейный характер. Датчик предназначен для точного контроля малых перемещений. [11]

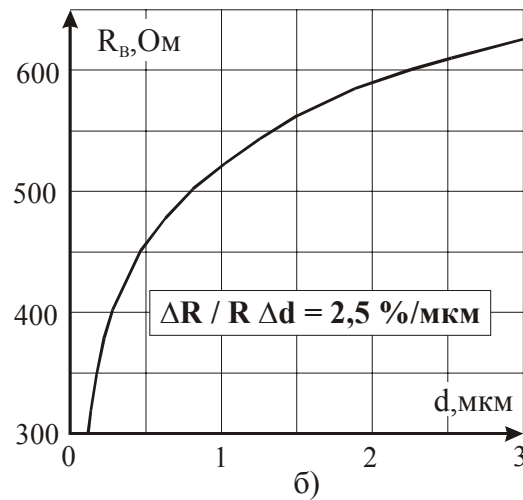
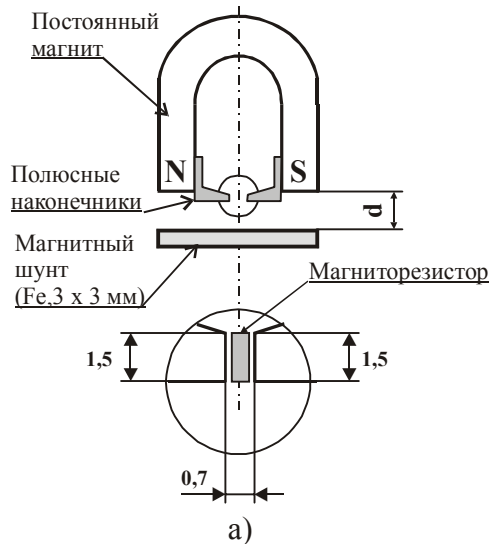


Рис. 5. 17. Датчик приближения с использованием магниторезистора типа СМ4-1: а - магнитная система; б - выходная характеристика

При использовании магнитной системы, приведенной на рис. 5.17.а цепью нагрузки датчика можно управлять как непосредственно изменением сопротивления магниторезистора, так и при помощи специальных схем на транзисторах (рис. 5.18) или интегральных микросхемах (рис. 5.19).

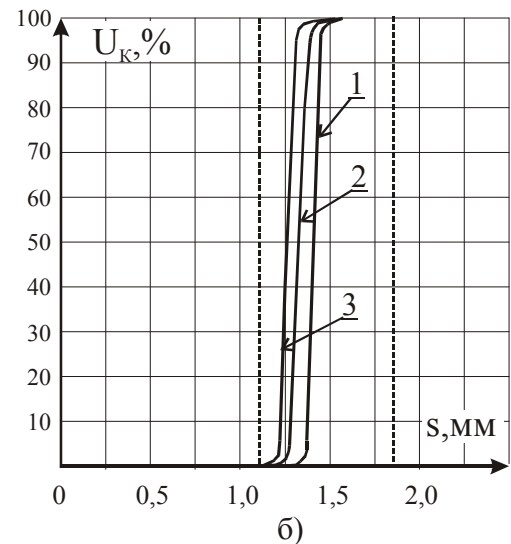
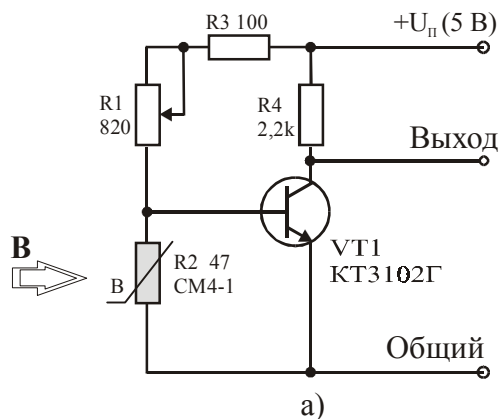


Рис. 5. 18. Датчик приближения с использованием магниторезистора типа СМ4-1: а - электрическая схема ; б - выходная характеристика

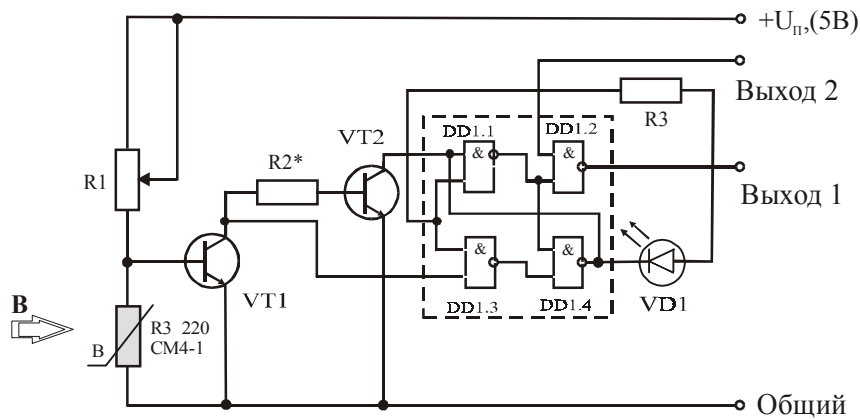


Рис. 5.19. Принципиальная электрическая схема датчика приближения с использованием стандартной логики и магниторезистора CM4-1

Схема, приведенная на рис. 5.19 достаточно проста и не требует особых пояснений. При приближении к датчику магнитного шунта, установленного на объекте контроля на определенное расстояние, на выходе схемы выдается стандартный цифровой сигнал в виде логического «0» или «1». Светодиод VD1 служит для индикации состояния датчика.

Датчики приближения на основе магнитодиодов

На рис. 5.20 в качестве примера изображена конструкция датчика приближения, выполненная с использованием магнитодиода. Эта конструкция также не требует особых пояснений.

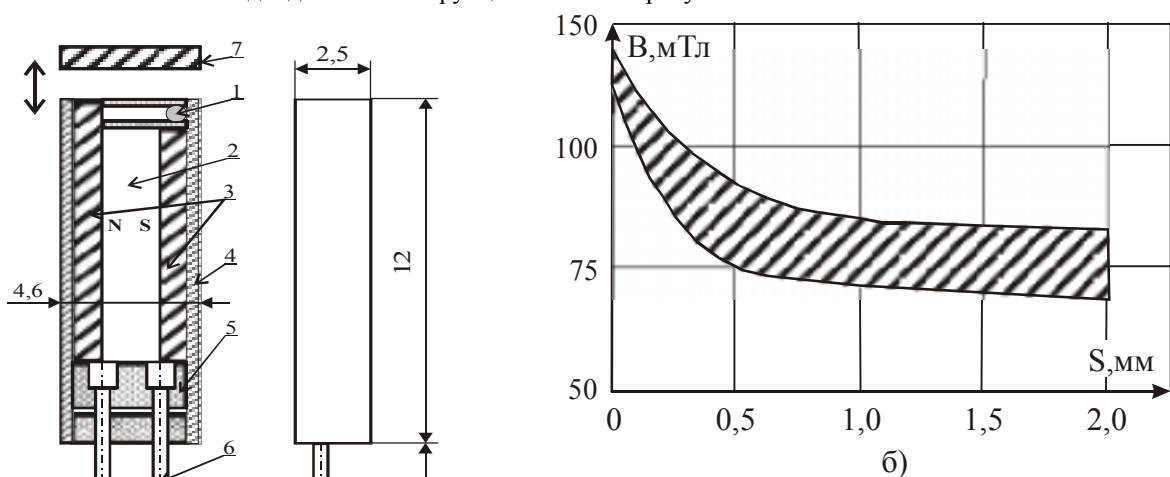


Рис. 5.20. Конструкция датчика приближения на магнитодиоде (а) и его выходная характеристика (б): 1 - магнитодиод; 2 - постоянный магнит; 3 - магнитопровод; 4 - защитный корпус; 5 - стеклотитовая плата; 6 - выводы; 7 - ферромагнитная деталь

Постоянный магнит 2 (размером $2 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$) выполнен из феррита бария (16БА90). Магнитопровод 3 изготовлен из магнитомягкого материала в виде двух пластин толщиной 1 мм.

При отсутствии вблизи торца датчика ферромагнитной детали 7 магнитный поток, замыкая полюсы магнита, равномерно распределяется по всему периметру и при этом на магнитодиод 1 воздействует магнитная индукция смещения порядка 80 мТл.

При приближении ферромагнитной детали 7 к торцу датчика наступает такой момент, когда происходит перераспределение направления замыкания магнитного потока. Основная часть потока, сконцентрированная пластинами магнитопровода, от торцов этих пластин по кратчайшему воздушному зазору (в котором установлен магнитодиод) замкнется через ферромагнитную деталь 7. При этом на магнитодиод будет воздействовать индукция около 100 мТл.

Сигнал от магнитодиода подается на стандартная ТТЛ-схему, которая формирует стандартный выходной сигнал в виде логического «0» или «1». При отсутствии ферромагнитной детали у торца датчика на выходе формируется сигнал логической «1», при приближении детали - логического «0».

Датчик устойчиво срабатывает при приближении ферромагнитной детали на расстояние не менее 0,4 мм в диапазоне температур от -10 до $+70^\circ \text{C}$. [28]

5.1.4. Координаточувствительные магнитные датчики

В качестве координаточувствительных магнитных датчиков (КМД) могут использоваться различные преобразователи магнитного поля, имеющие соответствующую топологию МЧЭ и включенные соответствующим образом.

В качестве одного из вариантов такого датчика рассмотрим 2-х координатный датчик линейного перемещения с использованием двух магниторезисторов, схема которого приведена на рис.5.23.

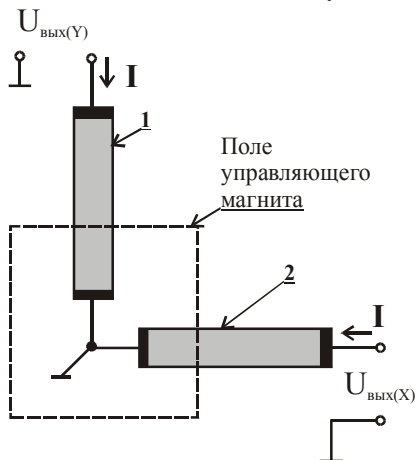


Рис. 5.21. Схема двухкоординатного магнитного датчика линейного перемещения с применением двух магниторезисторов.

Магниточувствительный элемент (рис. 5.21) состоит из одинаковых двух плеч (1 и 2), расположенных под прямым углом друг к другу. Управляющее магнитное поле имеет квадратную форму со стороной, равной или большей длины каждого элемента L . Каждый магниточувствительный элемент подключен к источнику тока, и через него протекает ток I . Если магнитное поле перемещается вдоль оси X , то сопротивление элемента 2 изменяется пропорционально перемещению и соответственно напряжение на его выводах изменяется пропорционально этому перемещению.

Это перемещение не вызывает изменения сопротивления элемента 2, так как горизонтальное перемещение не меняет площади элемента, пронизываемую управляющим магнитным полем. Аналогично перемещение по оси Y вызывает пропорциональное ему изменение выходного напряжения на выводах элемента 2, но не изменяет напряжение на выводе элемента 1. [16]

При перемещении поля в любом направлении в первом квадранте на выводах элементов 1 и 2 возникают напряжения, пропорциональные горизонтальной и вертикальной составляющим перемещения:

$$U_{\text{вых}X} = I * R_0 + I * R_0 \times \left(\frac{R_B}{R_0} - 1 \right) \times X \quad (5.6)$$

$$U_{\text{вых}Y} = I * R_0 + I * R_0 \left(\frac{R_B}{R_0} - 1 \right) \times Y \quad (5.7)$$

На рис. 5.22.приведена схема четырехкоординатного датчика для регистрации перемещения в любой точке плоскости X,Y

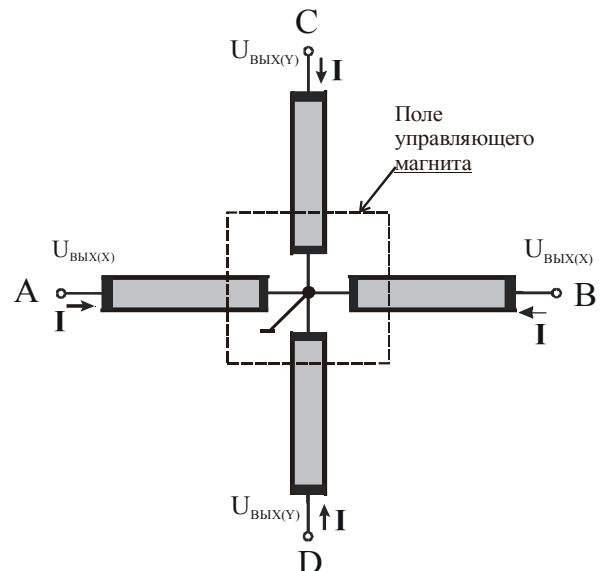


Рис. 5. 22. Схема четырехкоординатного магнитного датчика с применением магниторезисторов.

Четыре магниторезисторных элемента (рис. 5.22), каждый длиной L , расположены крестообразно. Элементы подключены к источникам тока, и через них проходит ток I . Выходное напряжение, пропорциональное составляющей перемещения по горизонтальному направлению снимается с выводов А и В, а выходное напряжение составляющей перемещения по вертикальному направлению – с выводов С и D.

Полусный наконечник имеет квадратную форму со стороной, равной длине каждого элемента L . Начальное положение датчика имеет место, когда наконечник расположен симметрично относительно центрального электрода, при этом половина длины каждого МЧЭ находится под воздействием управляющего магнитного поля и выходные напряжения, снимаемые с концов каждого элемента, равняются нулю. [16]

При перемещении полусного наконечника в любом направлении на плоскости X-0-Y на выводах элементов 1 и 2 возникают два независимых напряжения со знаком полярности, соответствующих направлению горизонтальной и вертикальной составляющих перемещения и пропорциональных им:

$$U_{\text{вых.X}} = 2I * R_0 \times \left(\frac{R_B}{R_0} - 1 \right) \times X \quad (5.8)$$

$$U_{\text{вых.Y}} = 2I * R_0 \times \left(\frac{R_B}{R_0} - 1 \right) \times Y \quad (5.9)$$

5.1.5. Промышленные образцы датчиков перемещения

Промышленное производство магнитных датчиков перемещения осуществляется многими зарубежными фирмами. Наиболее известными являются фирмы: Honeywell, Murata, Allegro, Hitachi, Siemens, RS Components и др.

Зарубежными фирмами выпускается широкая номенклатура магнитных датчиков перемещения с использованием практически всех известных типов преобразователей магнитного поля.

Основные параметры и характеристики магнитных датчиков перемещения, выпускаемых ведущими зарубежными фирмами приводятся в главе 14 тома 2.

Далее в качестве примера приводятся характеристики отдельных типов датчиков перемещения, выпускаемых зарубежными производителями.

Датчики перемещения на основе магниторезисторов

На рис. 5.23 в качестве примера приведен внешний вид датчика перемещений типа FP-210, который выпускается фирмой Siemens A.G. с применением дифференциального «монокристаллического» магниторезистора.

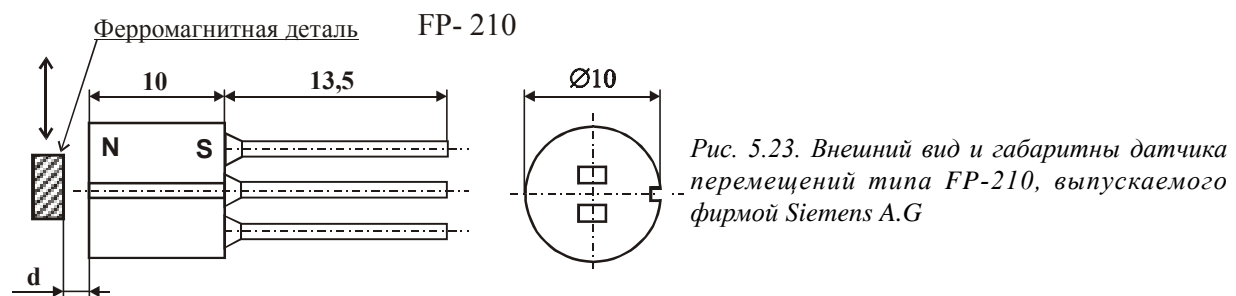


Рис. 5.23. Внешний вид и габариты датчика перемещений типа FP-210, выпускаемого фирмой Siemens A.G.

Датчик перемещений типа FP-210 построен по схеме с разомкнутой магнитной системой. Он содержит два «монокристаллических» магниторезистора, включенных по дифференциальной схеме и встроенный постоянный магнит. При этом магниторезисторы R_{1-2} и R_{2-3} включаются в схему моста (рис. 5.24.а), что позволяет компенсировать (в определенных пределах) уход параметров датчика при изменении температуры окружающей среды.

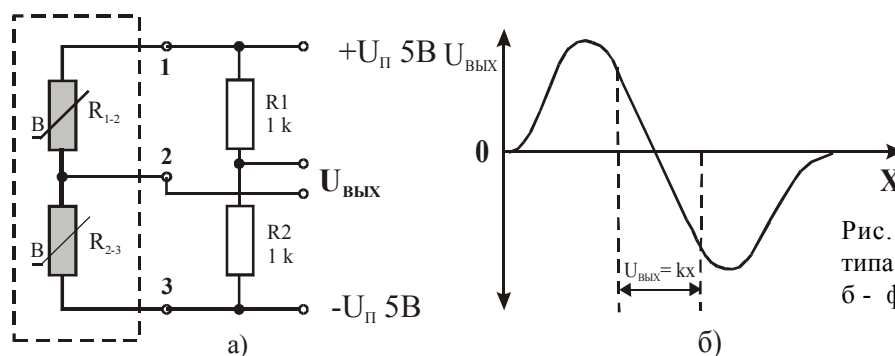


Рис. 5.24. Датчик перемещений типа FP-210: а - схема включения; б - форма выходного сигнала

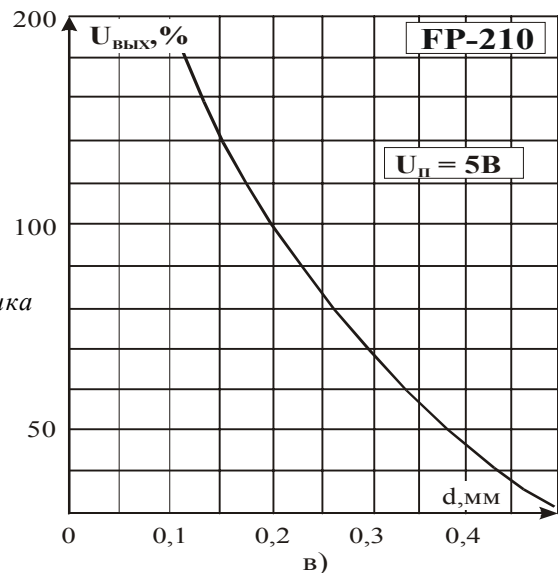


Рис. 5.24.в. Выходная характеристика датчика перемещений типа FP-210

Датчик (рис. 5.23) функционирует следующим образом. При приближении ферромагнитной детали, закрепленной на контролируемом объекте, к торцу датчика на выходе моста возникает сигнал разбаланса $U_{\text{ВЫХ}}$ изменяющийся в зависимости от положения перемещающейся детали (рис. 5.24.б). При этом имеется в виду, что ширина перемещаемой детали примерно равна ширине одного МЧЭ (порядка 2 мм). Из кривой (рис. 5.26.б.) видно, что на определенном участке (отмечен пунктирной линией) наблюдается линейная зависимость между $U_{\text{ВЫХ}}$ и расстоянием X .

Характер изменения выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$, т.е. достижение им сначала максимума, а затем минимума (или наоборот) зависит (при неизменной полярности источника питания моста) от направления движения перемещаемой ферромагнитной детали.

Так если деталь перемещается по отношению к торцу датчика снизу вверх, то изменение напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ имеет сначала максимум, а затем минимум, а при перемещении сверху вниз $U_{\text{ВЫХ}}$ будет иметь сначала минимум, а затем максимум.

Это обстоятельство может быть использовано для определения направления перемещения подвижной ферромагнитной детали. С этой целью напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ моста подается на вход переключающей схемы, гистерезис которой имеет несколько большее значение, чем возможные при отсутствии перемещаемой детали колебания значения $U_{\text{ВЫХ}}$. В этом случае переключающая схема будет фиксировать состояние, соответствующее последнему экстремуму $U_{\text{ВЫХ}}$.

На рис. 5.24.в. изображена зависимость выходного сигнала $U_{\text{ВЫХ}}$ в % от расстояния d между торцами подвижной ферромагнитной детали контролируемого объекта и датчика. За 100 % значения сигнала принято напряжение на выходе моста при $d = 0,2$ мм.

Масса FP-210 составляет всего 2,4 г.; диапазон рабочих температур от -25 до $+80^{\circ}\text{C}$; предельная частота переключений до 20 кГц. Величина сигнала на выходе моста при напряжении питания 5 В и расстоянии между ферромагнитной деталью и торцом датчика $d = 0,2$ мм составляет 850 мВ, а при удалении пластины на расстояние больше 5 мм составляет не более 180 мВ.

Датчики линейного перемещения на основе МЧМС

Конструкции магнитных датчиков линейного перемещения с применением магниточувствительных интегральных схем практически мало чем отличаются от приборов, разработанных с применением иных преобразователей магнитного поля.

На рис. 5.25 в качестве примера приведен внешний вид магнитного датчика линейных перемещений типа APS3A2AA.

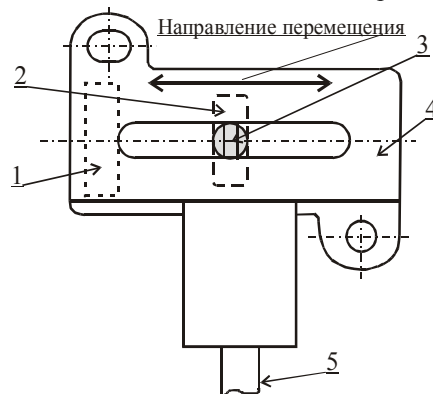


Рис. 5.25. Внешний вид датчика линейного перемещения типа APS3A2AA: 1 – магниточувствительная ИС; 2 – постоянный магнит; 3 – поводок; 4 – пластмассовый корпус; 5 – 3-х проводный кабель

В качестве преобразователя магнитного поля в датчике APS3A2AA использована кремниевая магниточувствительная микросхема 1. В состав датчика входит миниатюрный постоянный магнит 2, жестко соединенный с поводком 3.

Вектор перемещения контролируемого объекта передается датчику через поводок 3, который перемещает постоянный магнит 2 параллельно чувствительной поверхности МУМ.

Все элементы датчика размещаются в пластмассовом корпусе 4 из которого выходит 3-х проводный кабель 5, соединяющий датчик с внешними устройствами.

Основные параметры датчика типа APS3A2AA приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2. Основные параметры датчика типа APS3A2AA

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Длина рабочего хода, мм	19
2	Чувствительность, мВ/мм	237
3	Напряжение питания, В	8...16
4	Ток потребления, мА	10
5	Выходной ток, мА, не более	10
6	Нелинейность характеристики преобразования, %	$\pm 2,5$
7	Постоянная времени, мкс, не более	3
8	Повторяемость, %	$< 1,0$
9	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	-20...+85
10	Габаритные размеры, мм	34 x 34 x 22

На рис. 5.26 приведена конструкция датчика линейных перемещений, выпускаемого фирмой «ММТ». Конструкция датчика достаточно проста и не требует особых пояснений. В качестве магниточувствительного элемента 6 используется элемент Холла, размещенный в зазоре магнитной системы 5.

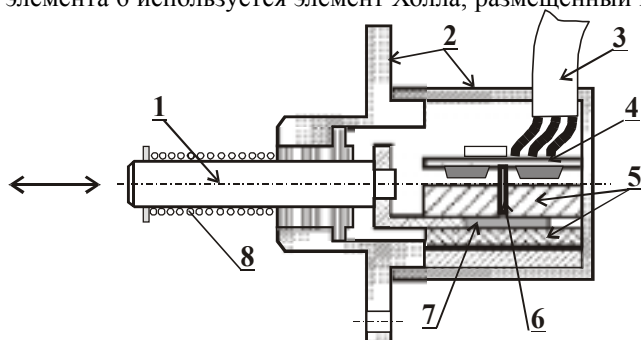


Рис. 5.26. Конструкция датчика линейных перемещений фирмы «ММТ»: 1- шток; 2- корпус; 3 - кабель; 4 - плата с электронной схемой; 5 - магнитная система; 6 - элемент Холла (ЭХ); 7 - магнитный шунт; 8 - возвратная пружина

Вектор перемещения контролируемого объекта через шток 1 передается подвижному магнитному шунту 7 перемещение которого приводит к изменению сигнала ЭХ. Сигнал элемента Холла усиливается электронной схемой, расположенной на плате 4. Электронная схема датчика содержит все элементы, необходимые для термостабилизации его основных параметров. Выходные характеристики датчика приведены на рис. 5.27, а его основные параметры приводятся в таблице 5.3:

Таблица 5.3: Основные параметры датчика линейных перемещений фирмы «ММТ»

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Длина рабочего хода, мм	30
2	Чувствительность, мВ/мм	400
3	Напряжение питания, В	5
4	Ток потребления, мА	10
5	Выходной ток, мА, не более	10
6	Нелинейность характеристики преобразования, %	$\pm 1,0$
7	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	-40...+130

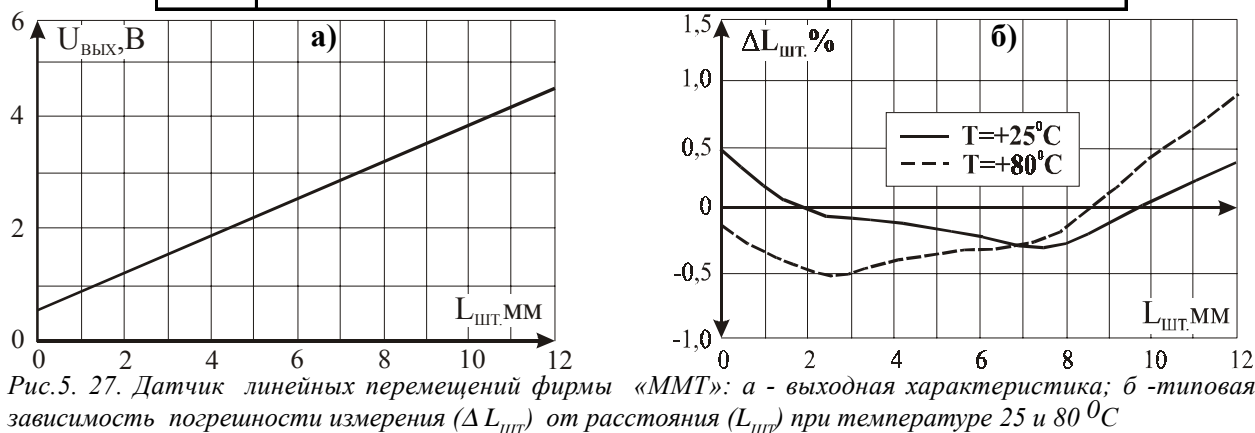


Рис. 5. 27. Датчик линейных перемещений фирмы «ММТ»: а - выходная характеристика; б - типовая зависимость погрешности измерения ($\Delta L_{\text{ШТ}}$) от расстояния ($L_{\text{ШТ}}$) при температуре 25 и 80 $^{\circ}\text{C}$

Датчики приближения на основе МУМ

Ведущим мировым производителем магнитных датчиков перемещения и приближения является фирма Honeywell, которая выпускает несколько серий таких датчиков.

Наибольшую известность получили датчики приближения серий 103SR, SR3 и 400SR. Преобразователем магнитного поля в этих датчиках служит магнитоуправляемая интегральная микросхема, размещаемая в цилиндрическом алюминиевом (103SR) или пластмассовом (SR3) корпусе. Датчики серии 400SR размещаются в прямоугольных пластмассовых корпусах. Внешний вид датчиков приведен на рис. 5.28.

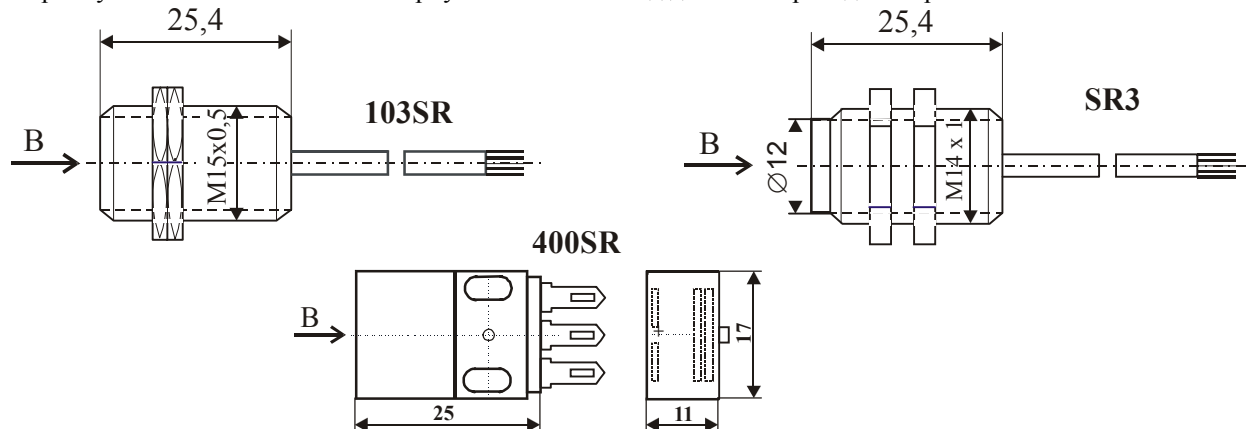


Рис. 5.28. Внешний вид датчиков приближения серий 103SR, SR3 и 400SR

Датчики имеют разомкнутую магнитную систему. Управляющее поле создается внешним постоянным магнитом, закрепляемом на контролируемом объекте.

Напряжение питания датчиков составляет от 4,5 до 24В при токе потребления от 4 до 13 мА (в зависимости от типа датчика). Выход датчиков рассчитан на работу в режиме «открытого коллектора» или в режиме «открытого эмиттера» с током коммутации до 20 мА.

Максимальная частота переключений датчиков не превышает 100 кГц. Диапазон рабочих температур составляет от $-40...+85$ °С до $-40...+100$ °С. Длина датчиков (103SR, SR3) не превышает 25,5 мм при диаметре до 15 мм.

Снаружи корпуса оба варианта датчиков имеют соответствующую резьбу. Габаритные размеры датчиков серии 400SR не превышают 25 x 17 x 11 мм. [37, 41, 49, 50]

Промышленные образцы датчиков приближения отечественного производства

В СССР практически не существовало специализированных предприятий, выпускающих магнитные датчики перемещения и приближения. Каждая отрасль разрабатывала и изготавливала для своих нужд ограниченные партии МД.

В качестве магниточувствительных элементов использовались магниторезисторы типа СМ4-1 и магнитоуправляемые микросхемы серии К1116КП. Некоторые предприятия использовали для этих целей дискретные элементы Холла известных серий ПХЭ, ДХП, ХИМ, ХИС и др.

В работе [18] сообщалось о разработке ПО «Гиперон» на базе магнитоуправляемых интегральных схем серии К1116 КП магнитных датчиков приближения типа МДП-01...МДП-05. Магнитные датчики МДП-01...МДП-05 изготовлены в точеных алюминиевых корпусах с наружной резьбой.

В 1999 году акционерным обществом «Сенсор» (г.Зеленоград) начато производство целой серии магнитных датчиков различного назначения. Датчики выпускаются на основе тонкопленочных магниторезисторов.[8]

Основные параметры и характеристики датчиков перемещения и приближения, выпускаемых наиболее известными производителями, приводятся в главе 14 тома 2.

См. также [8, 18, 26, 29, 31, 33, 34, 37, 38, 39, 41, 44, 47,48, 52, 53].

5.2. Щелевые магнитные датчики

Отдельный класс датчиков положения представляют, так называемые **щелевые** магнитные датчики (ЩМД). В зарубежной литературе такие датчики называются **лопастные** или **лопаточные**. ЩМД представляет единую конструкцию, содержащую постоянный магнит и преобразователь магнитного поля, расположенные на определенном расстоянии напротив друг друга. В качестве ПМП могут использоваться элементы Холла, магниторезисторы, магнитотранзисторы и другие приборы. Однако наибольшее распространение в качестве ПМП щелевых датчиков получили магнитоуправляемые интегральные схемы, использующие указанные преобразователи в качестве магниточувствительных элементов.

На рис. 5.29 приведено устройство простейшего щелевого магнитного датчика. Основными элементами ЩМД служат магнитоуправляемая микросхема и постоянный магнит (ПМ). При этом ПМ и МУМ жестко закреплены в оригинальном корпусе, изготовленном из немагнитного материала. Управляющим элементом датчика является шторка-замыкатель магнитного потока, выполненная из ферромагнитного материала.

Более сложные конструкции содержат специальные концентраторы магнитного поля, формирующие узкий рабочий зазор с равномерным распределением в нем магнитного потока.

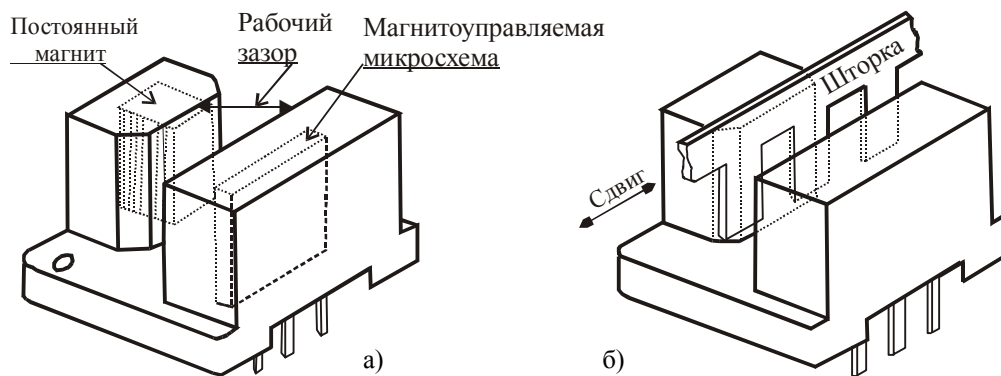


Рис. 5.29. Конструкция щелевого магнитного датчика

Принцип действия щелевого магнитного датчика иллюстрируется на рис. 5.29. Он достаточно прост. Нормальное состояние для датчика (рис. 5.29). – «Включено».

Если в рабочий зазор датчика ввести пластину из ферромагнитного материала (рис. 5.29.б), то линии поля прервутся и магнитоуправляемая микросхема перейдет в положение «Выключено».

Форма и конструкция шторки-замыкателя может быть, в зависимости от назначения датчика, самой разнообразной (Рис. 5.30).

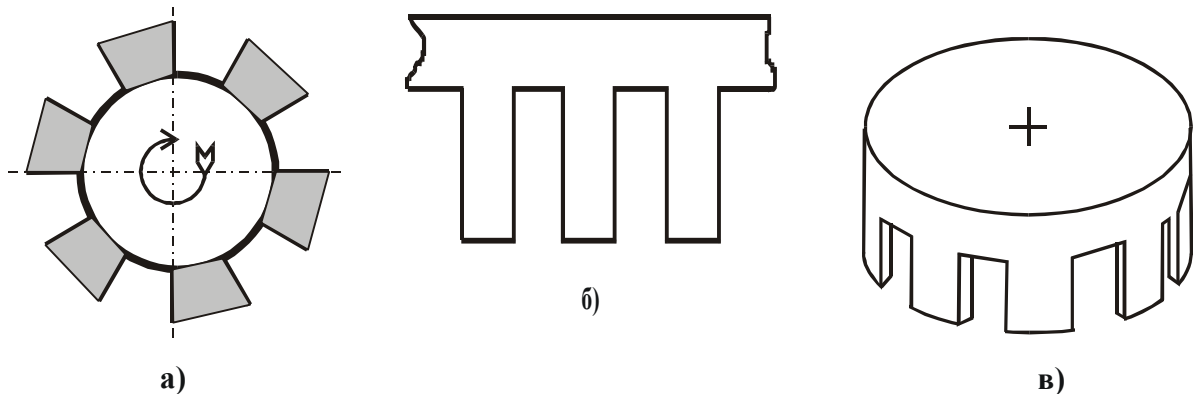


Рис. 5.30. Конструкция шторок-замыкателей, используемых в щелевых магнитных датчиках: а - колесо-обтюратор; б - «гребенка»; в - цилиндр.

На рис. 5.30.а показано плоское зубчатое колесо, используемое для модуляции оптического излучения. Существенное преимущество магнитного датчика перед оптронными – это отсутствие источника излучения (потребляющего сравнительно большой ток – 20...100 мА), а также нечувствительность к засветкам и запыленности.

На рис. 5.30.б показана, наиболее часто встречающаяся конструкция замыкателя, т.н. «гребенка». Окраина и зубцы гребенки имеют здесь прямоугольную форму, а не сектора (см. рис. 5.30.а), что улучшает форму выходных импульсов, когда интервал времени «Включено» больше, чем интервал времени «Выключено».

Наиболее компактным вариантом ЩМД представляет конструкция с цилиндрическим прерывателем (см. рис. 5.30.в).

Конструкция прерывателя, как правило, определяется как параметрами самого датчика, так и условиями его применения.

Наиболее распространенными минимальными размерами для прерывателей ЩМД являются: толщина $H=1...1,5$ мм, ширина зубца $b = 10$ мм, ширина окна $W = 10$ мм и высота зубца $h = 10$ мм. Максимальная толщина прерывателя ограничивается величиной рабочего зазора - δ .

Площадь зубца прерывателя, перекрывающего магнитный поток в зазоре между магнитом и приёмной поверхностью магнитоуправляемой ИС, определяется произведением $h \times b$. Однако выбранные недостаточно большими ширина окна W и высота зуба h могут привести к тому, что в зазоре датчика в переходный момент будут присутствовать края двух зубцов сразу, что приведет к ложным срабатываниям микросхемы.

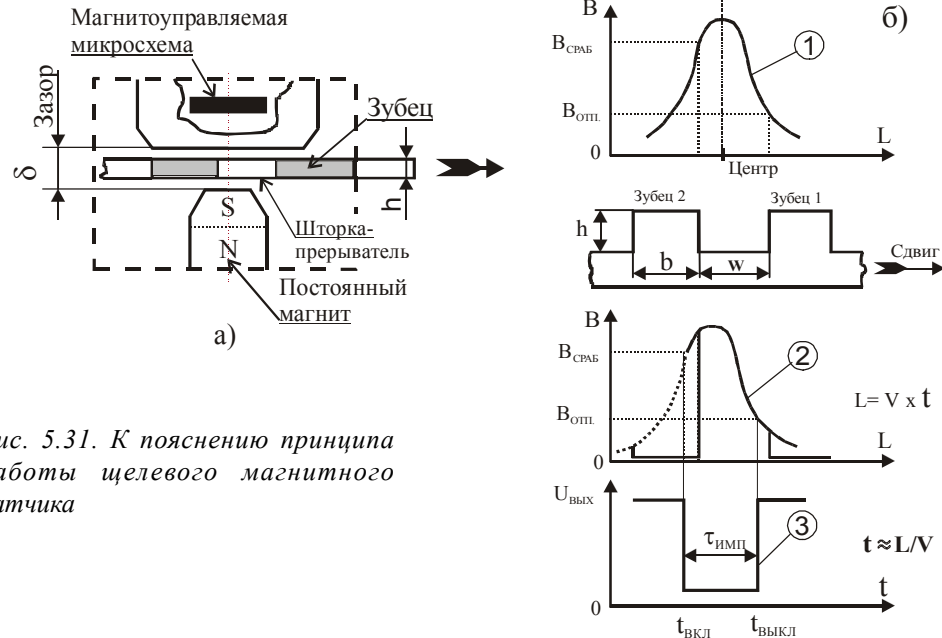


Рис. 5.31. К пояснению принципа работы щелевого магнитного датчика

На рис. 5.31.а приведены графики прохождения зубцом рабочего зазора ЩМД. Индукция B в свободном зазоре изменяется по длине L согласно графику 1 (рис. 5.31.б). Когда край зубца 2 входит в зазор, то он экранирует часть магнитного потока и зависимость $B=F(L)$ становится более сложной (см. график 2, рис. 5.31.б). График 3 соответствует положению во времени выходного импульса микросхемы, которая включилась в момент $t_{вкл}$ (индукция срабатывания $B_{сраб.}$) и выключилась в момент $t_{выкл}$ (индукция отпускания $B_{отп.}$). Так как линейная скорость движения зубца составляет V , то длительность выходного импульса для одиночного зубца можно определить:

$$\tau_{имп} = t_{вкл} - t_{выкл} = \frac{\Delta L}{V} \approx \frac{b}{V} \quad (5.10)$$

Однако, перед входом зубца 2 в зазор; срез зубца 1 должен выйти за точку $B_{отп.}$ графика 1 (рис. 5.31.б).

5.2.1. Примеры технической реализации щелевых магнитных датчиков

Простейший вариант конструкции щелевого магнитного датчика можно реализовать, используя магнитоуправляемую микросхему и миниатюрный постоянный магнит.

На рис. 5.32 в качестве примера приведен внешний вид и габаритные размеры миниатюрного щелевого магнитного датчика, реализованного на основе отечественной магнитоуправляемой микросхемы К1116КП9 и постоянного магнита из сплава «самарий-кобальт».

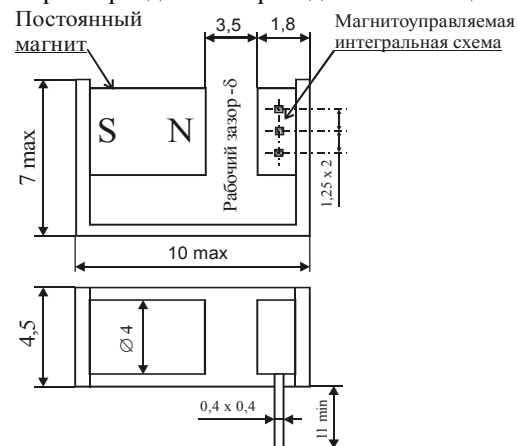


Рис. 5.32. Внешний вид и габаритные размеры миниатюрного щелевого магнитного датчика, реализованного на основе отечественной МУМ типа К1116КП9 и постоянного магнита из сплава «самарий-кобальт»

Таблица 5.4. Основные параметры миниатюрного щелевого магнитного датчика, реализованного на основе МУМ типа К1116КП9

№ п/п	Наименование параметра, ед. измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	4,5...5,5
2	Ток потребления, мА	6...10
3	Ток коммутации, мА	25
4	Коммутируемое напряжение, В	1,5...16
5	Напряжение логического «0», В, не более	0,4
6	Напряжение логического «0», В, не более	($U_{пит}$ - 0,4)
7	Время переключения, нс, не более	400
8	Температурный уход точки срабатывания /отпуска мкм / °С не более	10
9	Ширина рабочего зазора, мм	3,5
10	Габариты зубца шторки-замыкателя, мм, не	6 x 6 x 0,9
11	Диапазон рабочих температур, °С	-45...+85
12	Гарантированный ресурс работы, ч	5000
13	Габаритные размеры, мм	7 x 10 x 4,5
14	Масса, г, не более	5

Щелевые датчики с большим рабочим зазором

Щелевые магнитные датчики с большим рабочим зазором (более 10 мм), как правило, используются на объектах со значительным отклонением управляющего элемента (замыкателя или магнита - активатора) при перемещении их на объекте контроля.

Наиболее типичным случаем являются щелевые магнитные датчики, используемые для контроля положения лифтовых кабин. При этом ширина рабочего зазора (щели) может составлять от 20 до 40 мм при глубине щели 30...50 мм. Индукция магнитного потока, падающего на МЧЭ, в таких случаях составляет 0,05...1 мТл, что приводит к определенным трудностям при разработке ЩМД.

На практике могут использоваться два варианта конструкции таких датчиков.

Первый - применение высокочувствительной магнитоуправляемой ИС и пластины-замыкателя изготовленной из материала, обладающего очень малой величиной остаточной намагниченности. Наиболее пригодными материалами для изготовления замыкателей являются «муметалл» или феррит с магнитной проницаемостью более 1000.

В втором случае применяются две магнитоуправляемые ИС, размещаемые на обеих сторонах рабочего зазора (щели), а в качестве активатора используется достаточно мощный постоянный магнит

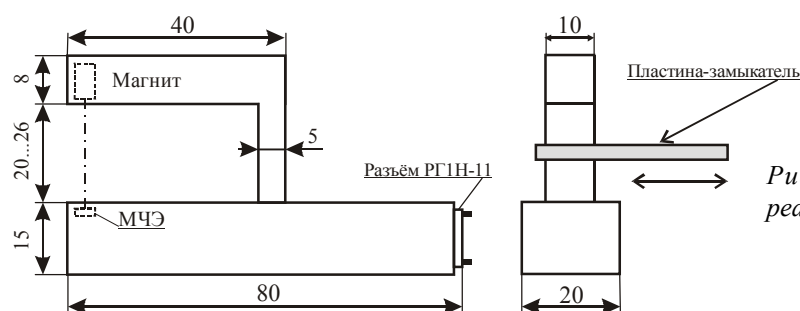
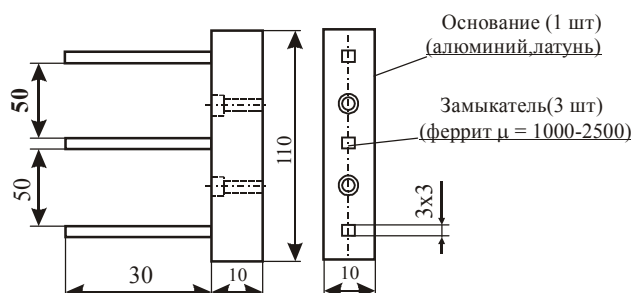
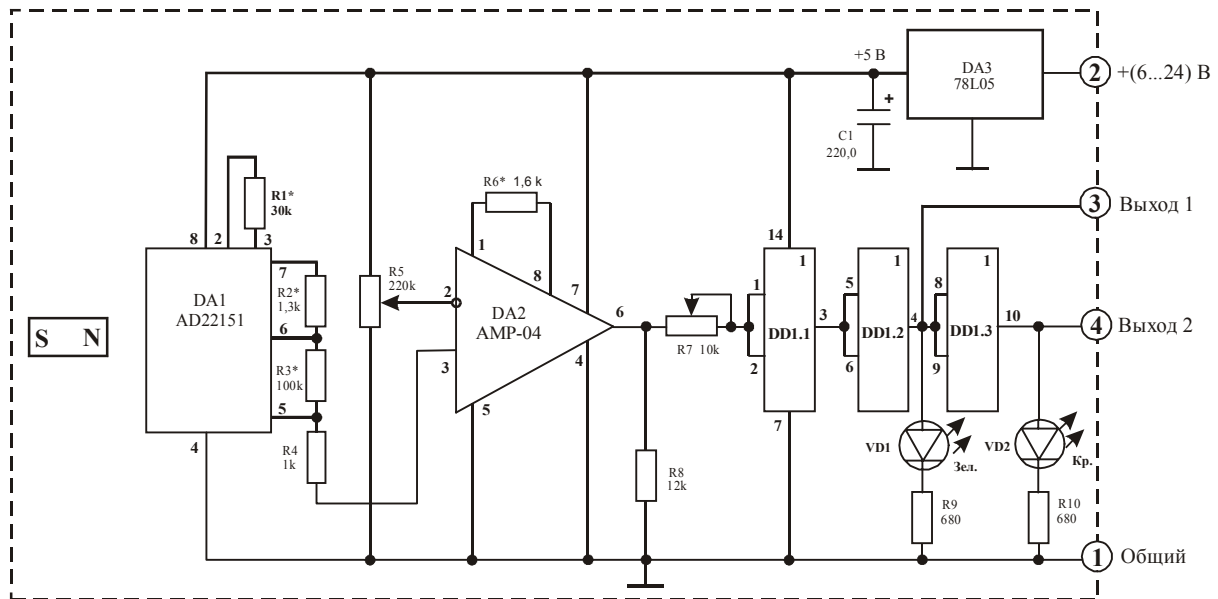


Рис. 5.33.а. Конструкция ЩМД, реализованного по первому варианту

Рис. 5.33.б. Конструкции пластины-замыкателя ЩМД, реализованного по первому варианту



На рис.5.33 приведена конструкция ЩМД, реализованная по первому варианту. В качестве МЧЭ использована высокочувствительная МЧМС типа AD22151, включенная на вход инструментального усилителя типа AMP-04, работающего в режиме компаратора. В качестве встроенного источника магнитного поля используется постоянный магнит из сплава NdFeB ($B=180$ мТл), а в качестве управляющего элемента служит прямоугольный стержень из феррита с $\mu > 1000$. Точность срабатывания датчика составляет порядка $\pm 0,5$ мм. Электрическая схема датчика приведена на рис. 5.34.



DA1 - магниточувствительная ИС типа AD22151;
DA2 - инструментальный усилитель AMP-04;
DA3 - стабилизатор типа 78L05;
DD1 - микросхема 2ИЛИ-НЕ типа К561ЛЕ5.

Рис. 5.34. Электрическая схема ЩМД, реализованного по первому варианту

На рис. 5.35 приведена конструкция ЩМД, реализованная по второму варианту. Функциональная схема датчика приведена на рис. 5.36.

В качестве МЧЭ используются два полевых элемента Холла типа FEHS-01, включенные на входы компараторов типа P554CA3. С выхода компараторов сигнал поступает на вход схемы «И-ИЛИ» (DD1), а затем на триггер (DD2). Датчик питается от двухполярного источника.

В качестве управляющего элемента служит прямоугольный магнит из сплава SmCo. Точность срабатывания датчика составляет порядка $\pm 0,25$ мм.

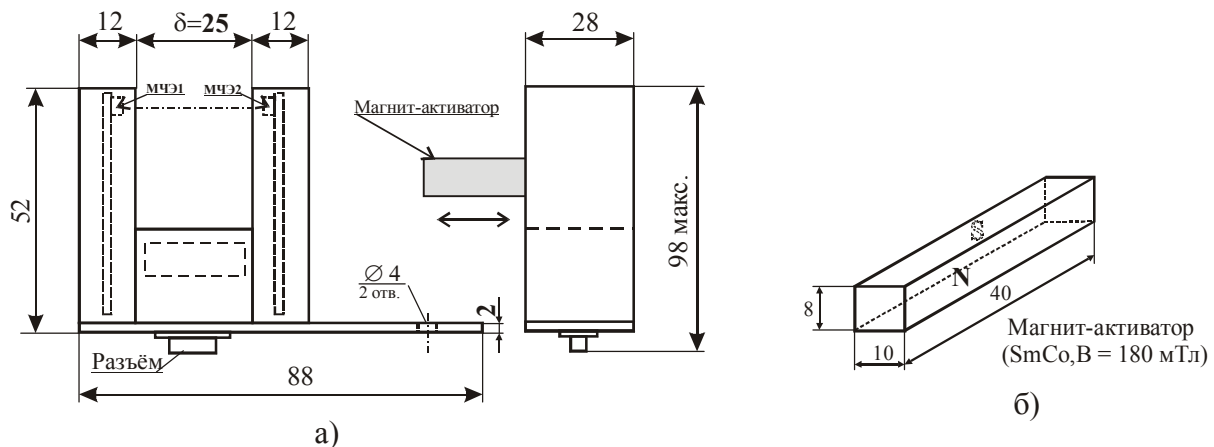
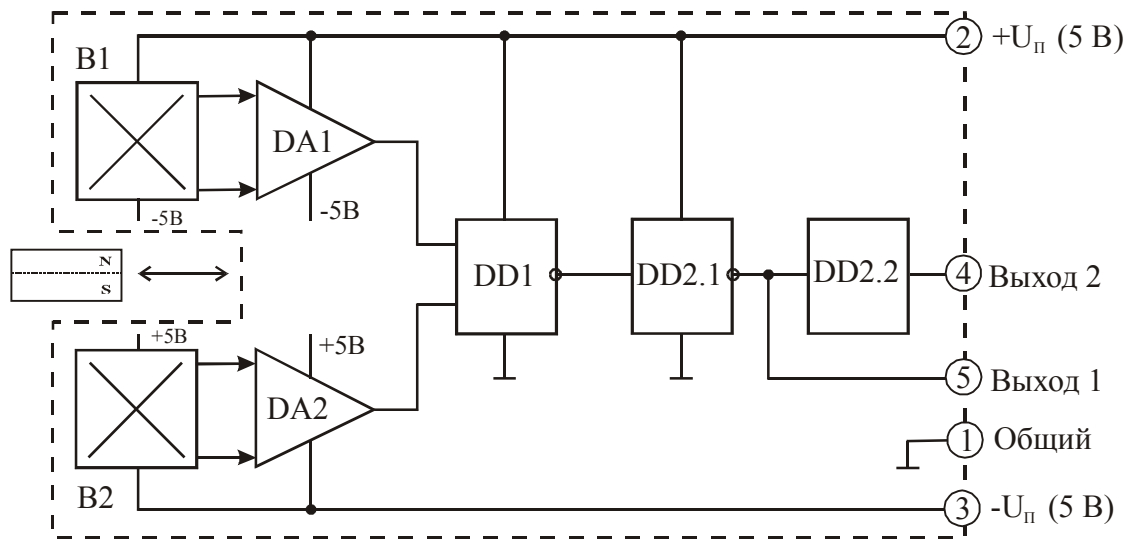


Рис. 5.35. ЩМД, реализованного по второму варианту: а - конструкция ; б - конструкция магнита-активатора



B1, B2 - полевые элементы Холла типа FEHS-01;
 DA1, DA2 - компараторы типа КР544СА3;
 DD1 - схема ИЛИ типа К555ЛЛ1;
 DD2 - схема триггера типа К555ТЛ1.

Рис. 5. 36. Функциональная схема ЦМД, реализованного по второму варианту конструкции

Следует отметить, что датчик, реализованный по первому варианту (рис. 5.33) обладает недостаточной помехоустойчивостью при работе в условиях электромагнитных помех, возникающих при работе промышленного оборудования.

Многоканальные щелевые магнитные датчики

Определенный интерес представляют многоканальные щелевые магнитные датчики - МЩМД.

На рис. 5.37 в качестве примера приведена конструкция 5-ти разрядного щелевого магнитного датчика.

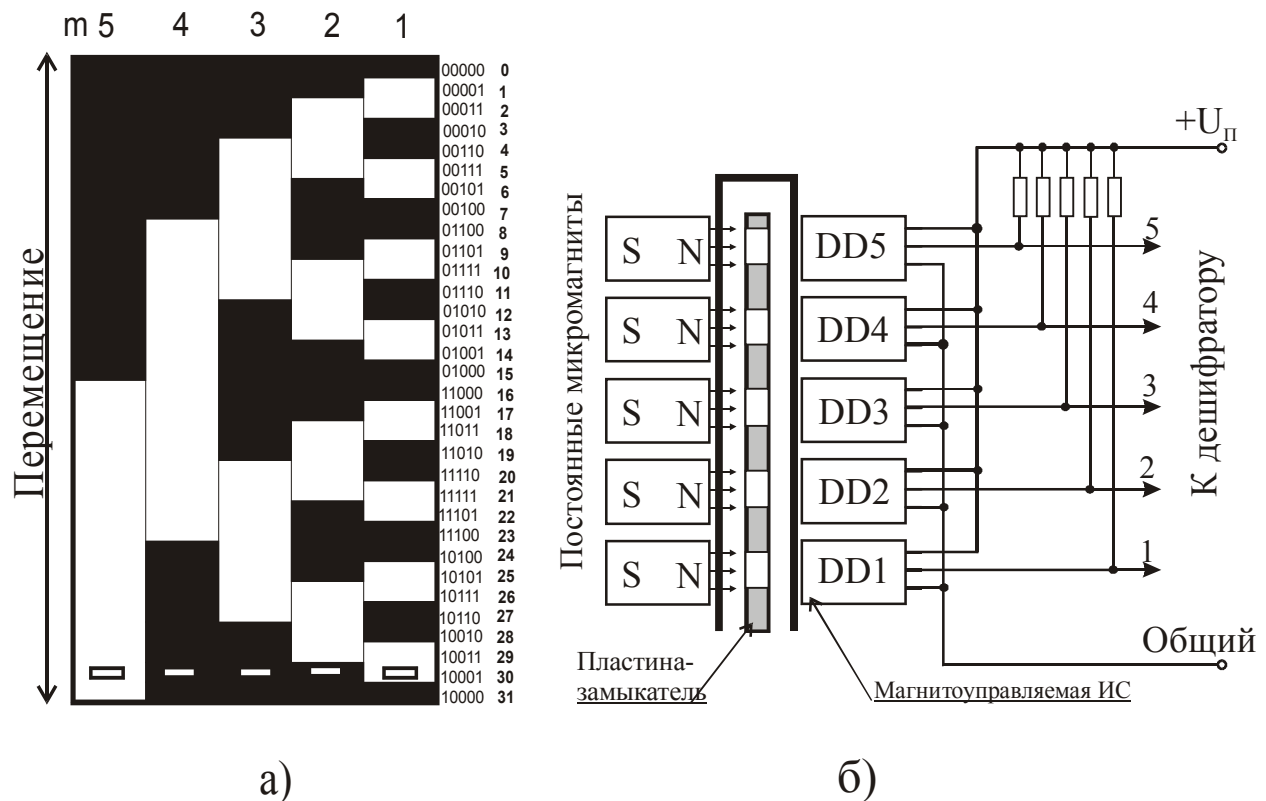


Рис. 5.37. Устройство многоканального щелевого магнитного датчика: а – кодовая пластина-замыкатель; б - структурная схема.

В качестве замыкателя используются плоские квадратные или круглые пластины с отверстиями или полюсами, воспроизводящими код Грея. (См. рис. 5.37.а). Пластина-замыкатель механически соединяется с объектом контроля. В зависимости от конструкции МЩМД может использоваться как в качестве датчика перемещения (плоская пластина-замыкатель), так и в качестве датчика угла поворота, (когда в качестве замыкателя используется круглый плоский диск). Каждый канал датчика представляет собой пару «магнит-магнитоуправляемая ИС», считывающую сигнал одного разряда. Сигналы с выходов датчика поступают непосредственно на дешифратор, где преобразуются в необходимую форму.

В многоканальных ЩМД должны использоваться магнитоуправляемые ИС, обладающие высокой чувствительностью и высокой разрешающей способностью.

При использовании высококачественных магнитов (из сплавов типа «самарий-кобальт» или «неодим-железо-бор») и высокочувствительных магнитоуправляемых интегральных схем возможно создание малогабаритных щелевых магнитных датчиков с геометрической разрешающей способностью порядка 0,1...0,5 мм.

5.2.2. Промышленные образцы щелевых магнитных датчиков

В настоящее время освоен промышленный выпуск широкой номенклатуры щелевых магнитных датчиков. Ведущей фирмой является Honeywell, которая выпускает несколько серий ЩМД: 1AV, 3AV, 4AV и SR16/17.

Щелевые магнитные датчики типа 1AV2, 1AV10 и 2AV54, в основном, применяются в бесконтактных прерывателях электронных систем зажигания двигателей внутреннего сгорания.

Напряжение питания указанных датчиков составляет от 4,5 до 24 В (в зависимости от типа прибора). Потребляемый ток 7...13 мА при токе коммутации 4...20 мА.

Для датчиков предусмотрены две основные схемы подключения нагрузки «с открытым коллектором» или «с открытым эмиттером».

Датчики предназначены для жестких условий эксплуатации при воздействии высокой температуры (до 150⁰С) и вибрации с ускорением до 40g. [41, 51]

Фирмой Siemens выпускаются ЩМД типа HKZ 101, который является аналогом датчика 2AV54. Внешний вид датчика типа 2AV54 приведен на рис. 5.38.

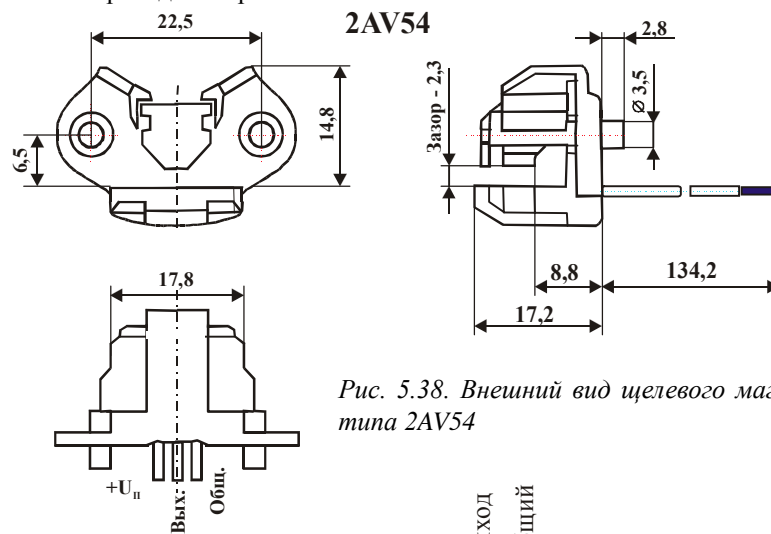


Рис. 5.38. Внешний вид щелевого магнитного датчика типа 2AV54

Фирмой Concord Sensor Inc. выпускается щелевой магнитный датчик типа CS6450, предназначенный для широкого применения.

Отечественной промышленностью на базе магнитоуправляемых микросхем типа К1116КПЗ освоен промышленный выпуск двух щелевых магнитных датчиков типа ДМИ-1 и ДМИ-2. Название датчиков представляет собой аббревиатуру - Датчик Моента Искрообразования.

Датчики ДМИ-1 и ДМИ-2 используются для определения положения подвижного объекта, на котором укрепляют шторку - замыкатель из ферромагнитного материала.

Общий и габаритные размеры вид датчика ДМИ-1 приведен на рис. 5.39.

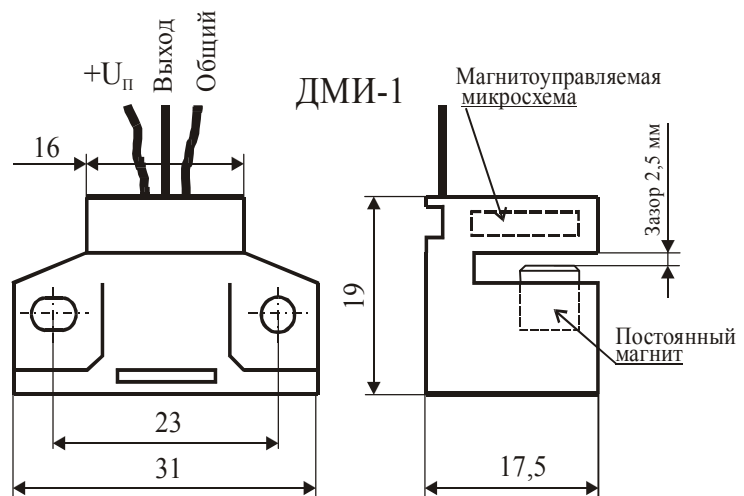


Рис. 5.39. Внешний вид и габариты щелевого магнитного датчика типа ДМИ-1

В пластмассовом корпусе датчика размещены магнитная система с постоянным магнитом и магнитоуправляемая микросхема типа К1116КПЗ.

Датчик ДМИ-2 содержит дополнительно инвертирующий усилитель мощности на транзисторе КТ815А. Элементы усилителя и датчик ДМИ-1 смонтированы на небольшой печатной плате дугообразной формы.

Порядок работы датчика ДМИ-1. При введении зубца замыкателя в зазор, последний шунтирует большую часть магнитного потока, падающего на магниточувствительный элемент магнитоуправляемой ИС (К1116КПЗ). В результате чего происходит уменьшение индукции до порога отпускания $V_{отп}$ микросхемы и на выходе датчика устанавливается уровень логической «1». При выходе зубца из зазора индукция увеличивается и при достижении порога срабатывания $V_{сраб}$ микросхемы происходит обратная смена уровня выходного напряжения с «1» на «0».

Выходной сигнал датчика ДМИ-1 при наличии зубца шторки в зазоре соответствует высокому уровню (логическая «1»), а датчика ДМИ-2 – низкому (логический «0»). Направление движения шторки в зазоре датчика любое.

Датчики ДМИ-1 и ДМИ-2 предназначены для использования в системах бесконтактного зажигания двигателей современных легковых автомобилей. Они устойчивы к воздействию маслобензиновой смеси в соответствии с ГОСТ 3940-84.

Датчики ДМИ-2 снабжены защитой от бросков питающего напряжения, характерных для бортовой сети автотракторной техники.

В таблице 5.5 приведены основные параметры отечественных датчиков типа ДМИ-1, ДМИ-2 и датчика 2AV54 (фирмы Honeywell), предназначенных для использования в системах электронного зажигания.

Таблица 5.5. Основные параметры датчиков типа ДМИ-1, ДМИ-2 и 2AV54

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип датчика / значение параметра		
		ДМИ-1	ДМИ-2	2AV54
1	Напряжение питания, В	6...16	6...16	12
2	Ток потребления, мА	13	20	22
3	Ток коммутации, мА	25	250	40
4	Коммутируемое напряжение, В	1,5...16	1,5...16	4,5...24
5	Напряжение логического «0», В, не более	0,4	0,6	0,4
6	Напряжение логической «1», В, не менее	($U_{пит} - 0,4$)	($U_{пит} - 0,4$)	($U_{пит} - 2$) _{min}
7	Время переключения, нс, не более	400	400	500
8	Температурный уход точки срабатывания /отпускания, мкм / °С, не	2	2	Н/Д
9	Ширина рабочего зазора, мм	2,4	2,4	2,3
10	Габариты зубца шторки-замыкателя, мм,	10x10x0,9	10x10x0,9	12x10,5x1
11	Габаритные размеры, мм	31,2x19,5x19	58x29x23	32x20,7x19,7
12	Гарантированный ресурс работы, ч	5000	5000	20000
13	Масса, г, не более	30	50	30
14	Диапазон рабочих температур, °С	-45...+125	-45...+100	-40...+150

Кроме датчиков типа ДМИ в СССР был разработан датчик момента искрообразования типа М1ЦРФ, имеющий аналогичные параметры. Однако сведений о серийном производстве этого датчика в России не имеется. [7]

В 1999 году АО «Сенсор» объявлено о выпуске щелевых магнитных датчиков серии СМАЗ-П06М. Основные параметры датчиков приводятся в главе 15 тома 2. [8]

5.2.3. Применение ЩМД в системах электронного зажигания

Конструкция щелевых магнитных датчиков типа 1AV2A, 1AV10A, 2AV54 и др. оптимизирована для использования их в качестве бесконтактного прерывателя в электронных системах зажигания автомобильной техники.

Электронная система зажигания в процессе эксплуатации практически не требует обслуживания и обладает следующими основными преимуществами:

- напряжение, подводимое к свечам зажигания, увеличивается по сравнению с напряжением в классической системе, что позволяет увеличить зазор в свечах зажигания на 20-30% относительно стандартного, в связи с чем происходит полное сгорание топлива и связанные с ним повышение мощности и экономичности двигателя, уменьшение нагарообразования, снижение токсичности отработанных газов;
- облегчается пуск холодного двигателя при низких температурах;
- повышается срок службы прерывателя (определяется его механическим износом).

Щелевой магнитный датчик устанавливают в прерыватель-распределитель двигателя вместо контактной группы. ЩМД выполняет функцию бесконтактного прерывателя, определяющего моменты зажигания горючей смеси в цилиндрах.

Шторку-замыкатель в этом случае изготавливают в виде стакана (см. рис. 5.30.в.), по окружности которого прорезаны прямоугольные окна. Число окон равно числу цилиндров двигателя.

Шторка укреплена так, что при вращении вала в зазоре датчика поочередно проходят окна и зубцы. При этом датчик формирует последовательность низковольтных прямоугольных импульсов искрообразования, которую система зажигания преобразует в высоковольтные разряды в свечах цилиндров двигателя.

Щелевые магнитные датчики типа 1AV2A, 1AV10A и 2AV54, как правило, используются в комплекте со специальными интегральными схемами электронного зажигания (драйверами).

На рис. 5.40 в качестве примера приведена схема использования ЩМД в комплекте с интегральной микросхемой-драйвером типа L482 или L482D1. [15]

При использовании более совершенной системы зажигания современной автомобильной техники, кроме датчика прерывателя, ЩМД могут применяться в качестве: датчиков угла поворота, расхода воздуха, угла открытия дроссельной заслонки и т.д. (Подробнее см. [23, 24]).

Современные щелевые магнитные датчики обладают очевидными преимуществами перед разомкнутыми оптронными парами. В первую очередь, можно отметить - отсутствие источника излучения, и, следовательно – высокую экономичность ЩМД.

Щелевые магнитные датчики не боятся посторонних засветок, агрессивных сред, а также загрязнений, пыли и дымов.

Основные параметры наиболее известных типов щелевых магнитных датчиков, выпускаемых ведущими производителями приведены в главе 15 тома 2.

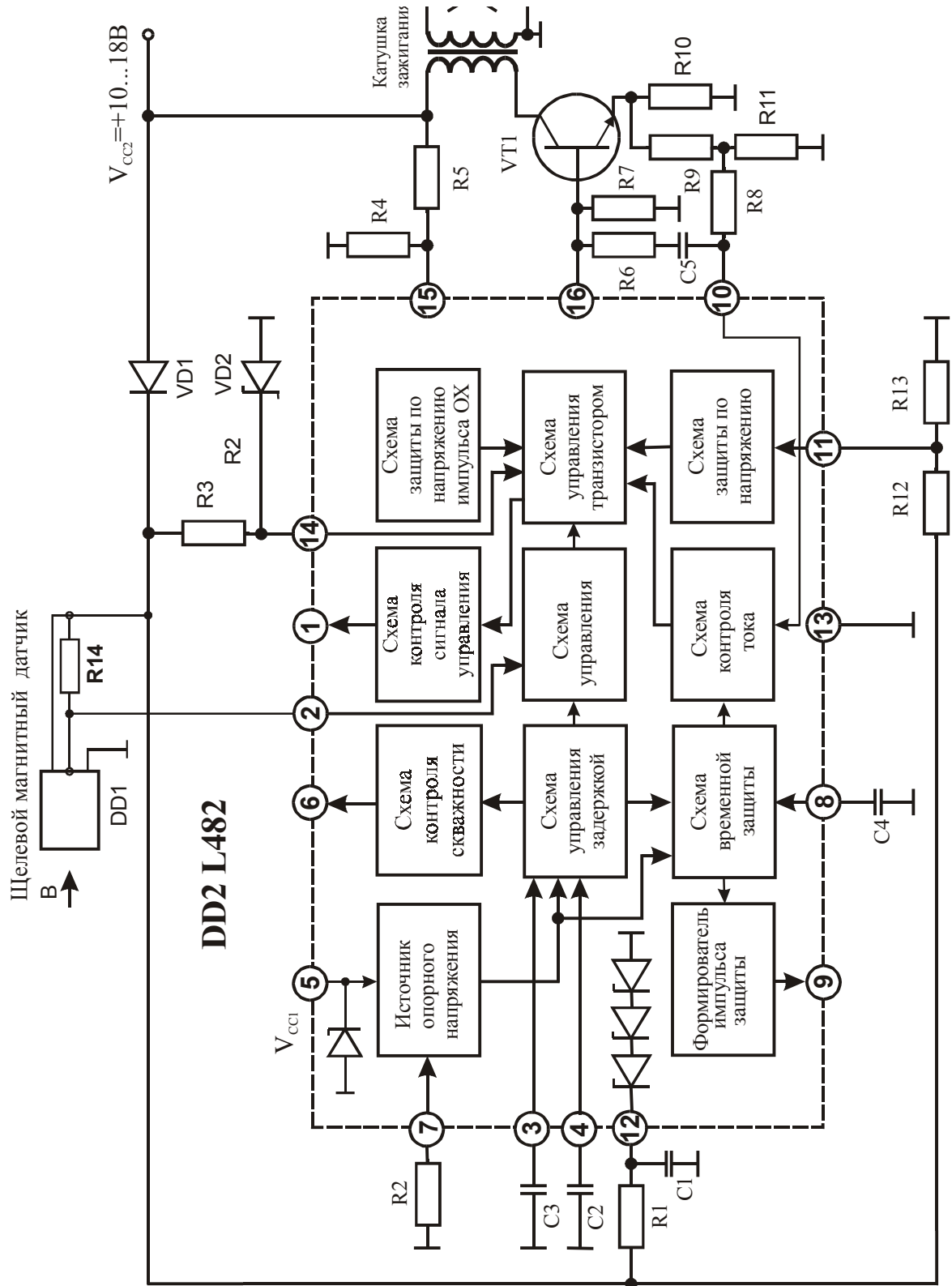


Рис. 5.40 Схема использования ЩМД в комплекте с интегральной микросхемой-драйвером типа L482 или L482D

5.3. Магнитные датчики угла поворота

Магнитные датчики типа угла поворота представляют достаточно большую группу изделий микромагнитоэлектроники.

По виду выходного сигнала их можно условно разделить на две группы:

- аналоговые датчики угла, сигнал на выходе которых пропорционален углу поворота;
- цифровые, часто называемые преобразователями типа «угол-код». Сигнал на выходе таких датчиков выдается в виде цифрового кода.

При этом наибольшее распространение получили двоично-рефлексный или двоично-десятичный рефлексные коды, а также код Грэя (по ГОСТ 12814-74). [5]

В качестве аналоговых датчиков угла поворота широко используются бесконтактные переменные резисторы, описанию работы которых посвящена глава 6.3.

5.3.1. Аналоговые датчики угла поворота

Простейшим датчиком угла поворота может служить магниторезистор с кольцевым расположением 4-х магниточувствительных элементов, включенных в схему моста. (рис.5.41).

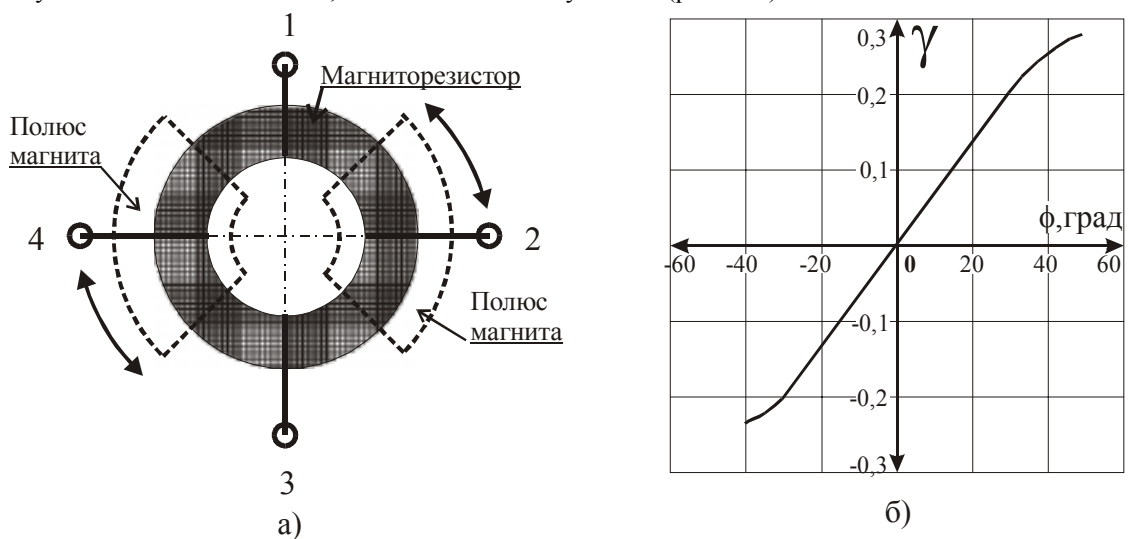


Рис. 5.41. «Кольцевой» магниторезистор: а - внешний вид; б - функциональная характеристика: 1,3 - выводы входа; 2,4 - выводы выхода

Датчик подобной конструкции работает в диапазоне углов до $\pm 30^\circ$ при достаточно хорошей линейности выходной характеристики.

В работе [16] приведена конструкция датчика угла поворота в котором используется матрица магниторезисторов. На рис. 5.42 приведен вариант конструкции такого датчика.

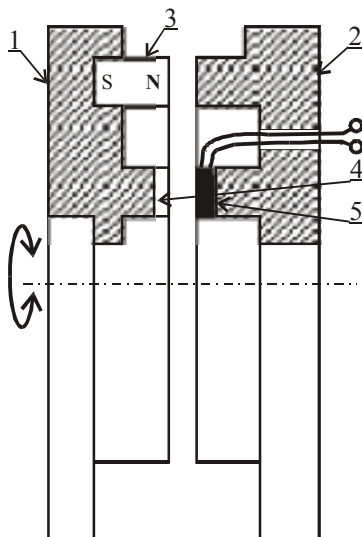


Рис. 5.42. Вариант конструкции датчика угла поворота в котором используется матрица магниторезисторов: 1,2 - кольцевые магнитопроводы; 3 - кольцевой постоянный магнит; 4- зубцы; 5 - магниторезисторная матрица

Датчик угла поворота содержит два кольцевых магнитопровода 1 и 2, установленных соосно и разделенных зазором. Кольцевые магнитопроводы (1,2) выполнены П-образными и установлены торцами друг к другу, на одном из торцов магнитопровода 1 установлен кольцевой постоянный магнит 3, а другой торец выполнен зубчатым. Зубцы 4 расположены равномерно по окружности с периодом повторения Т. На торце второго магнитопровода, сопряженного с зубчатым торцом первого магнитопровода, устанавливается магниторезисторная матрица 5.

Магнитное поле в датчике создается с помощью кольцевого магнита 3, при этом в рабочем воздушном зазоре, образованном зубцами магнитопровода 1 и магниточувствительными элементами матрицы, устанавливается определенная напряженность магнитного поля.

Период изменения напряженности магнитного поля для каждой из групп магниторезисторов в матрице равен периоду Т расположения зубцов магнитопровода 1.

Ввиду расположения магниторезисторов в матрице с шагом равным $(5/4)T$, и объединения их в четыре группы, причем объединение магниторезисторов производится через шаг, равный пяти периодам Т, происходит изменение сопротивления каждой группы магниторезисторов по своему закону.

В исходном (условно-нулевом) положении магниторезисторы первой группы расположены против соответствующих зубцов магнитопровода 1, а магниторезисторы третьей группы против пазов между зубцами. Магниторезисторы второй и четвертой группы будут располагаться в данном случае на границе между зубцами и пазом.

При повороте магнитопровода относительно оси вращения на четверть периода Т расположение магниторезисторов первой, третьей и второй, четвертой групп изменится на противоположное. Выбором соотношения между размерами зубцов магнитопровода 1 и размерами магниторезисторов в матрице можно добиться получения изменения суммарного сопротивления магниторезисторов каждой группы при вращении магнитопровода 1 по следующим законам:

$$R_B(1 + k \times \cos \rho \times \phi) \quad (5.11)$$

$$R_B(1 + k \times \sin \rho \times \phi) \quad (5.12)$$

$$R_B(1 - k \times \cos \rho \times \phi) \quad (5.13)$$

$$R_B(1 - k \times \sin \rho \times \phi) \quad (5.14)$$

Где R_B – сопротивление группы магниторезисторов при воздействии среднего магнитного поля;

k – коэффициент модуляции магнитного поля;

ρ – число зубцов магнитопровода;

ϕ – угол поворота магнитопровода.

Объединив магниторезисторы первой, третьей и второй, четвертой групп, можно получить две дифференциальные пары, с которых можно получить два сигнала, изменяющихся по синусному и косинусному законам.

Таким образом, участие в формировании выходных сигналов датчика четырех групп большого количества магниточувствительных элементов позволяет значительно повысить точность измерения угла поворота, так как в этом случае происходит усреднение различного рода технологических отклонений при изготовлении и юстировке датчика. Наличие дифференциальных пар позволяет компенсировать температурную нестабильность.

В результате чего получается магнитомодуляционный синусно-косинусный датчик угла, простой в изготовлении и обладающий повышенной точностью.

В работе [4] приведена конструкция прецизионного датчика угла поворота в котором используется тонкопленочный магниторезисторный мост типа КМЗ10. На рис. 5.43 приведен возможный вариант конструкции такого датчика.

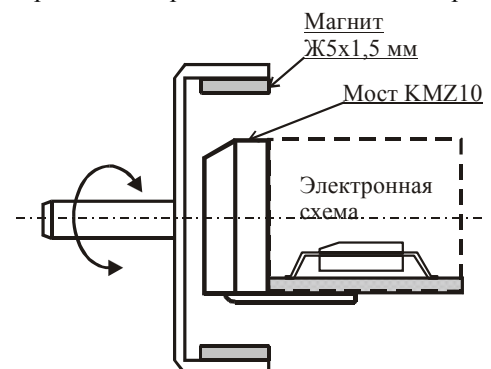


Рис. 5.43. Вариант конструкции магнитного датчика угла поворота с использованием магниторезисторного моста типа КМЗ10

В этом случае магниторезисторный мост расположен в магнитном поле, создаваемом двумя миниатюрными постоянными магнитами, установленными на вращающейся рамке. Устанавливая нулевое положение рамки как параллельное оси X, (т.е. с магнитным полем в H_x направлении) можно измерять угловое перемещение до ± 85 градусов. Магниторезисторный мост KMZ10 включается в электрическую схему, приведенную на рис. 5.44.

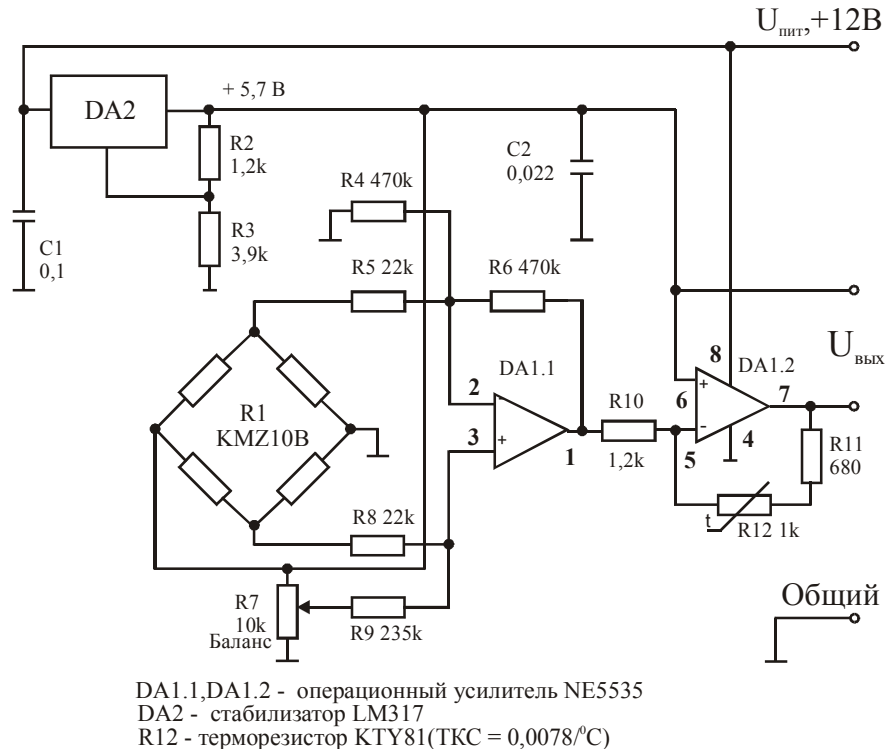


Рис. 5.44. Электрическая схема магнитного датчика угла поворота с использованием магниторезисторного моста KMZ10

Схема работает следующим образом. Выходной сигнал с магниторезисторного моста R1 операционными усилителями DA1.1 и DA1.2. Кремниевый температурный датчик R12 (КТУ 81) установленный в цепи обратной связи усилителя DA1.2 изменяет его усиление при изменении температуры окружающей среды. На рис. 5.45 приведены выходные характеристики датчика угла поворота при температуре от -25 и $+40$ $^{\circ}C$.

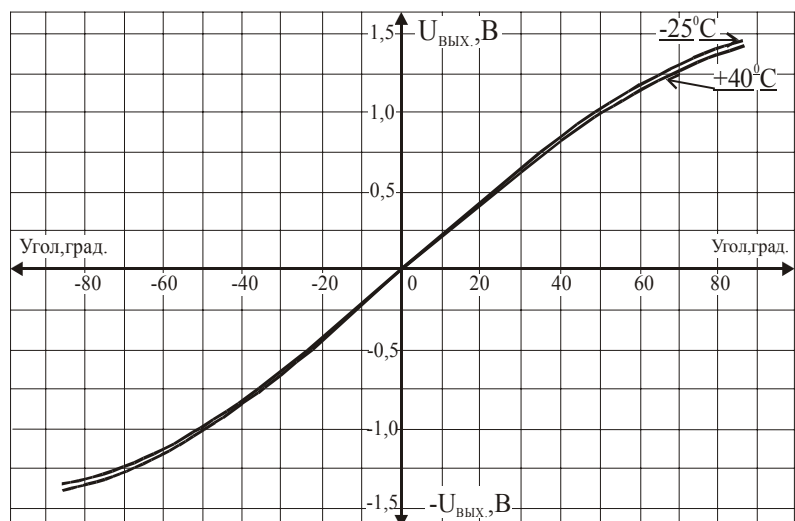


Рис. 5.45. Выходная характеристика магнитного датчика угла поворота с использованием магниторезисторного моста KMZ10

Использование специализированных микросхем в датчиках угла поворота

Особый интерес представляют магнитные датчики угла поворота с использованием специализированных интегральных схем и тонкопленочных магниторезисторов. В качестве примера можно привести микросхему типа UZZ9000, разработанную фирмой Philips Semiconductors.

Аналогичная схема предназначена для построения датчиков угла поворота, использующих два преобразователя магнитного поля. В качестве чувствительного элемента такого датчика используется сдвоенный тонкопленочный магниторезисторный мост типа KMZ41, также выпускаемый фирмой Philips. Магнитные оси мостов KMZ41 повернуты на 45° относительно друг друга.

При вращении источника магнитного поля относительно плоскости КМЗ сигналы ($U_{\text{ВЫХ.1}}$ и $U_{\text{ВЫХ.2}}$) мостов сдвигаются по фазе на 90° , что позволяет расширить диапазон контролируемых углов поворота (рис. 5.46). (Параметры КМЗ41 см. в главе 10 тома 2).

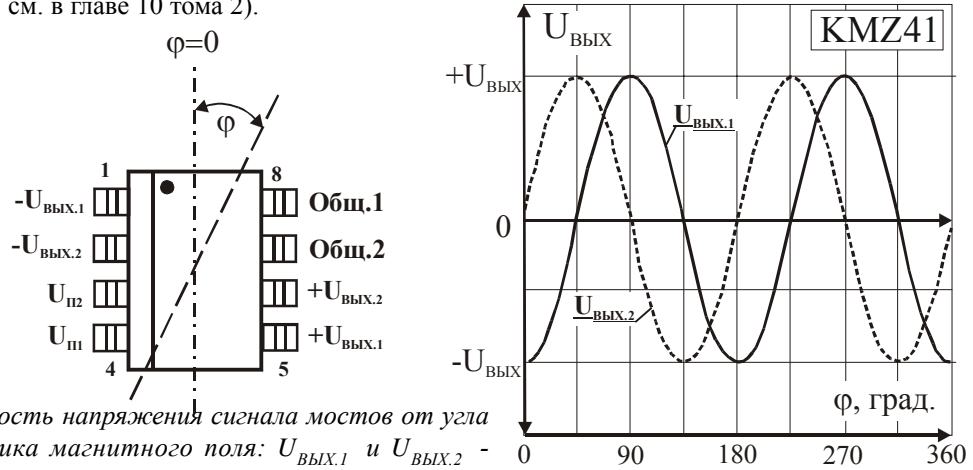


Рис. 5.46. Зависимость напряжения сигнала мостов от угла вращения источника магнитного поля: $U_{\text{ВЫХ.1}}$ и $U_{\text{ВЫХ.2}}$ - напряжение сигнала соответственно с выхода первого и второго мостов

Интегральная схема типа UZZ9000 имеет достаточно сложную структуру. Она содержит два АЦП, один 13-ти разрядный ЦАП и другие необходимые узлы. В схеме используется специальный алгоритм обработки сигналов с датчика. Микросхема размещается в 24-х выводном DIP корпусе.

Электрическая схема датчика угла поворота приведена на рис. 5.47 и не требует особых пояснений. Сигналы ($\pm V_{O1}$ и $\pm V_{O2}$) с мостов КМЗ41 подаются на два отдельных входа микросхемы UZZ9000. На выход микросхемы поступает аналоговый сигнал, пропорциональный углу поворота управляющего магнита.

В качестве управляющего устройства используется вращающийся постоянный магнит. [40, 46].

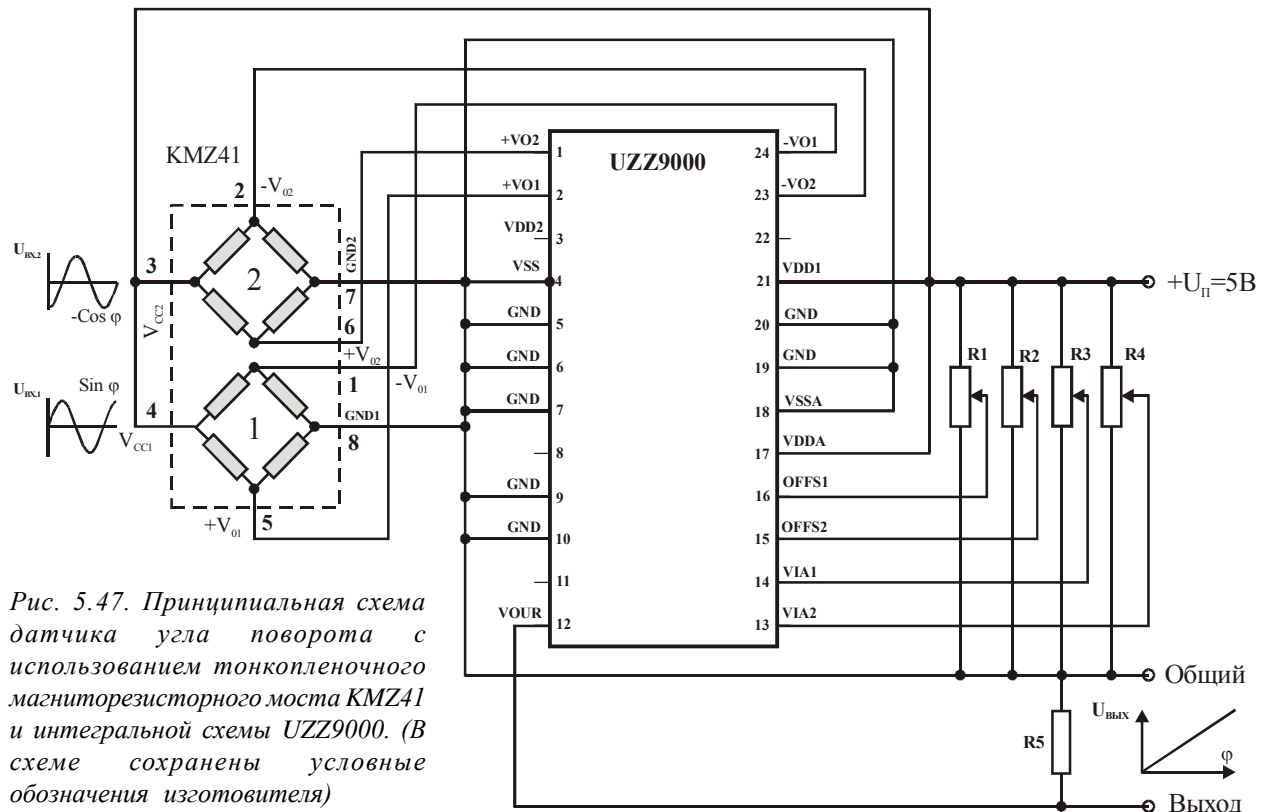


Рис. 5.47. Принципиальная схема датчика угла поворота с использованием тонкопленочного магниторезисторного моста КМЗ41 и интегральной схемы UZZ9000. (В схеме сохранены условные обозначения изготовителя)

Основные параметры датчика угла поворота, выполненного на основе тонкопленочного магниторезистора типа КМЗ41 и интегральной схемы UZZ9000 приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.6. Основные параметры датчика угла поворота с использованием тонкопленочного магниторезисторного моста KMZ41 и интегральной схемы UZZ9000

№ п/п	Наименование параметра, единица	Диапазон значений
1	Диапазон изменения входного параметра,	от 0 до 180 и (корректируется по шагам - 10^0)
2	Нулевая точка кривой вывода, градусов	от -5 до +5 и (корректируется по шагам $0,5^0$)
3	Разрешающая способность, градусов	0,05...1
4	Точность измерения углов, градусов, (в диапазоне)	$\pm 0,8$ (в диап. 30^0) $\pm 1,0$ (в диап. 100^0) $\pm 1,4$ (в диап. 180^0)
5	Напряжение питания, В	от 4,5 до 5,5
6	Ток потребления, мА	10
7	Выходное напряжение, % от УП	от 5 до 95
8	Постоянная времени, мс	1,2
9	Диапазон рабочих температур, ^0C	-45...+140
10	Габаритные размеры, мм	5 x 4 x 1,75

Датчики угла поворота с использованием магниточувствительных ИС

Наибольшее распространение получили датчики угла поворота, реализованные с использованием магниточувствительных интегральных микросхем на основе элементов Холла. Например, фирма Honeywell на основе МЧМС выпускает серию (RP) датчиков угла поворота. Датчики отличаются высокими магнитоэлектрическими и эксплуатационными параметрами. Они предназначены для использования в автомобильной электронике. Основные параметры датчика RP-200 приведены в таблице 5.6. Внешний вид и выходная характеристика датчика на приведены на рис. 5.48 и 5.49. [45]

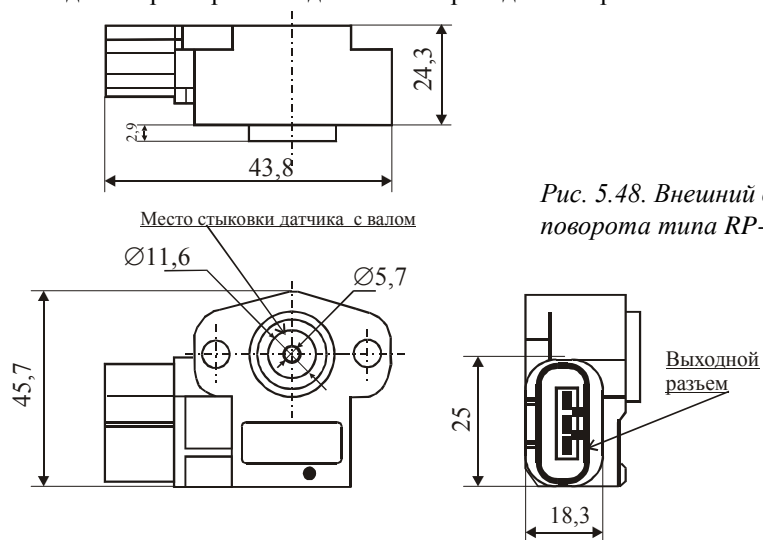


Рис. 5.48. Внешний вид и габариты магнитного датчика угла поворота типа RP-200

Рис. 5.49. Выходная характеристика магнитного датчика угла поворота типа RP-200

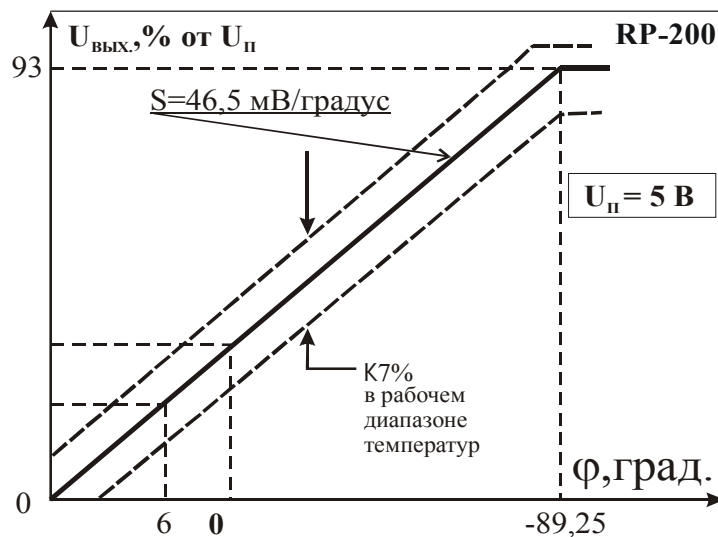


Таблица 5.7. Основные параметры датчика угла поворота RP-200 (фирма «Honeywell»)

№ п/п	Наименование параметра, единица	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 4,75 до 5,25
2	Ток потребления, мА, не более	15
3	Выходной ток, мА	1
4	Напряжение на выходе, В	от -0,5 до +5,0
5	Диапазон изменения входного параметра,	от 0 до -89,25
6	Нелинейность характеристики	± 7
7	Крутизна преобразования, мВ/градус	46,5
8	Момент на входном валу, Н*м	0,021...0,113
9	Диапазон рабочих температур, °C	-20...+135
10	Габаритные размеры, мм	45,7 x 43,8 x 24,3

5.3.2. Магнитодиодный преобразователь типа «угол-код»

На рис. 5.50 приведен общий вид магнитодиодного преобразователя «угол-код» типа ЦПУ-М, описание которого приведено в работах [9, 50]

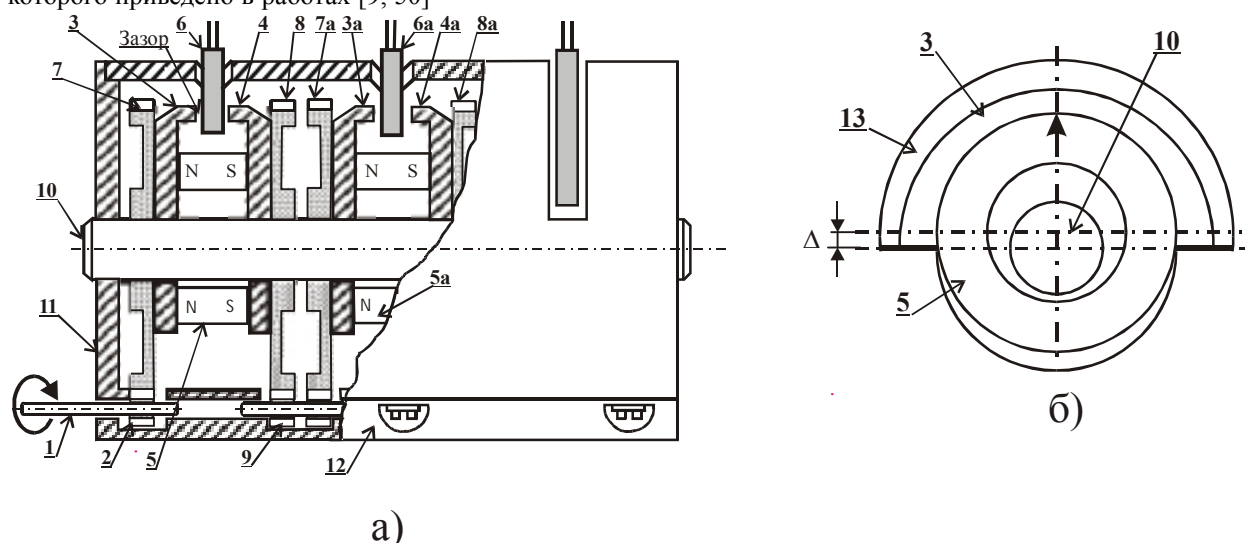


Рис. 5.50. Магнитодиодный преобразователь «угол-код» типа

ЦПУ-М: а - конструкция датчика; б - конструкция кодирующего элемента: 1 - входная ось; 2 - входная ведущая шестерня; 3, 3а, 4, 4а - магнитопроводы; 5, 5а - кольцевые магниты; 6, 6а - считывающие узлы; 7, 7а, - ведомые шестерни; 8, 8а - ведущие шестерни; 9 - редуктор; 10 - неподвижная ось; 11 - основание корпуса преобразователя; 12 - крышка корпуса; 13 - выступ.

Преобразователь состоит из следующих основных элементов: входной оси 1 с жестко закрепленной на ней шестерней 2, передающей входной угол поворота на кодирующий элемент (КЭ) точного отсчета, ведомых 7 и 7а и ведущих 8 и 8а шестерней, а также редукторов 9, обеспечивающих дискретную с соотношением 2: 20 связь между отсчетами, и считывающих узлов 6 с магнитодиодами. Считывающий узел (СУ) содержит 8 или 10 магнитодиодов, размещенных определенным образом. На рис. 5.51 приведен фрагмент электрической схемы считывающего узла, состоящий из 4-х магнитодиодов и схемы обработки сигнала

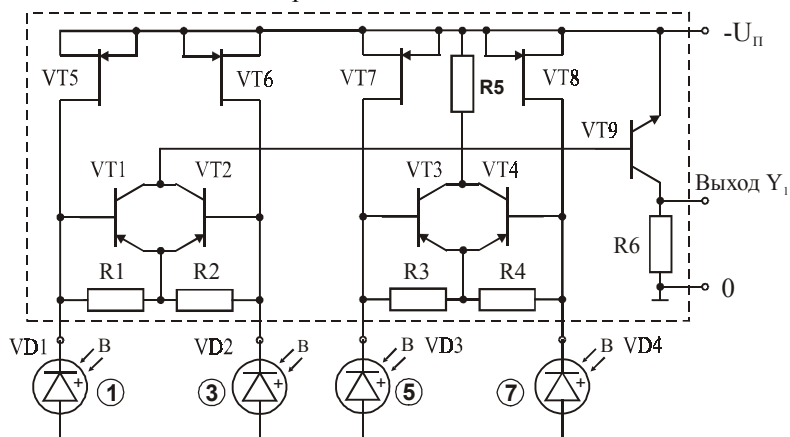


Рис. 5.51. Фрагмент принципиальной электрической схемы считывающего узла преобразователя «угол-код» типа ЦПУ-М.

Кодирующий элемент (рис. 5.51.6.) состоит из двух магнитопроводов 3 и 4, каждый из которых имеет выступ 13 между которыми образуется активная зона рабочего зазора с индукцией магнитного потока, создаваемого кольцевым магнитом 5 с осевой намагниченностью.

Кодирующий элемент имеет минимальное число границ перехода «1-0», т.е. всего две границы формирования магнитного поля заданной конфигурации на краях КЭ, где индукция изменяется от 0 до 0,3 Тл.

Элементы 3...8 используются для точного отсчета, кодирующего разряд «единиц» десятичного числа в двоично-десятичном рефлексном коде, а элементы 3а...8а служат для грубого отсчета ЦПУ-М, кодирующего разряд десятков десятичного числа в том же коде. Общее число дискретных значений равно 2000 для трехотсчетного ЦПУ и 200 для двухотсчетного.

Все детали преобразователя, кроме 3...5, выполнены из немагнитных материалов.

Принцип действия преобразователя заключается в следующем. В нулевом положении ($\alpha = 0$) все магнитодиоды считывающих узлов 6 и 6а будут находиться вне рабочего зазора, следовательно, на выходе узлов 6 и 6а сигналы будут равны логическому «0».

При изменении входного угла до $\alpha = 18^\circ$ в рабочем зазоре (где $B_z > 0$) будет находиться лишь один из магнитодиодов считывающего узла 6 точного отсчета, что будет соответствовать логической «1» именно на его входе, а сигнал на остальных входах будет соответствовать логическому «0».

Через каждые 18° в рабочем зазоре будут появляться магнитодиоды узла 6, однако сигнал на выходах узла 6а будет соответствовать логическому «0» при изменении входного угла от 0 до 180° .

При $\alpha = 180^\circ$ произойдет первое переключение, т.е. поворот КЭ разряда десятков грубого отсчета и, следовательно, один из магнитодиодов узла 6а окажется в рабочем зазоре, что будет соответствовать логической «1» в разряде десятков ЦПУ-М.

Поскольку отношение дискретного переключающего механизма равно 2:20, то переключение будет происходить через каждые 180° и, следовательно, в момент $\alpha = 10 * 180^\circ$ произойдет первое переключение в ряде сотен ЦПУ-М и т.д.

Электронные узлы преобразователя ЦПУ-М выполнены в виде унифицированных модулей, содержащих в зависимости от регулируемого кода по 8 или 10 магнитодиодов, а вся электронная схема состоит из двух гибридных интегральных схем, размещенных в двух стандартных корпусах. [50]

В таблице 5.8 приведены основные параметры преобразователя ЦПУ-М.

Таблица 5.8. Основные параметры магнитного датчика «угол-код» типа ЦПУ-М

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений	
		В двоично-десятичном коде	В коде Грея
1	Диапазон изменения входного параметра (А), градусов	360 360	0...100 0...64
2	Число дискретных отсчетов, N	2000	1024
3	Угловая величина кванта (α_N), градусов	18 ± 9	$22,5 \pm 11$
4	Число двоичных разрядов	13	10
5	Выходной код	Двоично-десятичный	Код Грея
6	Напряжение питания, В	$12 \pm 10\%$	
7	Ток нагрузки двоичного разряда, мА, не более	10	
8	Момент на входном валу (М), г/см, не более	30	
9	Параметры кодирующего элемента (КЭ): - диаметр, мм - рабочий зазор, мм - индукция в рабочем зазоре, Тл - крутизна поля на границе перехода «0 – 1»,	22,0 2,0 $0,3 \pm 0,03$ 0,2	
10	Масса кодирующего элемента, г	13,5	
11	Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$	-30...+55	

5.4. Магнитные датчики скорости вращения

Датчики скорости вращения (ДСВ) представляют собой, т.н. частотные датчики. Принцип действия таких датчиков состоит в преобразовании скорости вращения (углового перемещения) в частоту изменений потока энергии (электрического тока или напряжения).

Выходной сигнал ДСВ может быть представлен в виде синусоидального изменения величины (напряжения), постоянной величины, модулированной по периодическому (синусоидальному) закону, или в виде последовательности коротких импульсов. Для использования в цифровых системах контроля последний вид сигнала более предпочтителен.

При измерении скорости вращения с использованием магнитных датчиков наибольшее распространение получили два метода: **метод счета зубьев ферромагнитных шестерен** и **метод счета полюсов многополюсных постоянных магнитов**, укрепленных соответственно на валах исследуемых объектов.

5.4.1. Датчики скорости вращения, основанные на счете зубьев ферромагнитных шестерен

В данном случае датчик скорости вращения представляет собой магнитоэлектронное устройство, состоящее из преобразователя магнитного поля и смещающего магнита, размещенных в одном корпусе. В качестве ПМП, в зависимости от назначения датчика, могут использоваться практически любые из известных МЧЭ: магниторезисторы, элементы Холла, магнитодиоды и магнитотранзисторы, магнитотиристоры, магнитоуправляемые и магниточувствительные микросхемы, и др.

Принцип работы таких датчиков иллюстрируется на рис. 5.52.

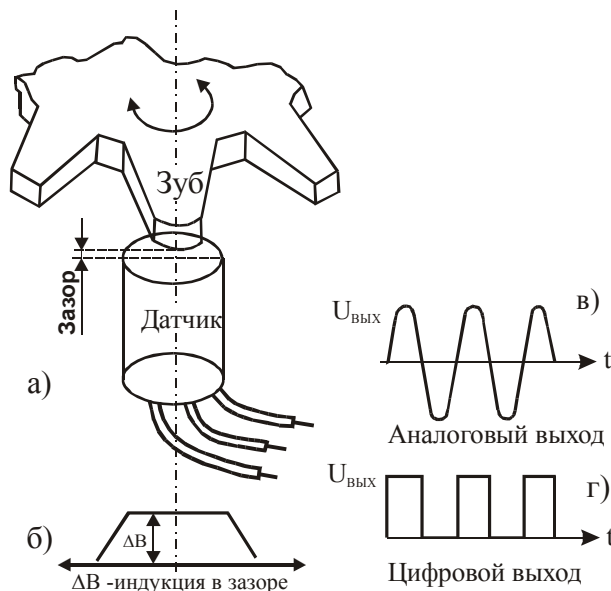


Рис. 5.52. Датчик скорости вращения: а - схематическое устройство; б - зависимость индукции в зазоре от положения зуба; в - вид сигнала в аналоговой форме; г - вид сигнала в цифровой форме

При перемещении зубчатого колеса из ферромагнитного материала в зоне действия датчика изменяется плотность магнитного потока (рис. 5.52.б.). Если вблизи МЧЭ оказывается зуб из ферромагнитного материала, то плотность магнитного потока возрастает, и напряжение сигнала на выходе датчика будет представлять смену состояний типа «зуб - воздушный зазор». Вращающаяся шестерня вызывает появление модулированного сигнала. Частота импульсов за один оборот совпадает с числом зубьев.

В зависимости от используемой элементной базы, сигнал с выхода датчиков может сниматься как в аналоговой (рис. 5.52.в), так и цифровой форме (рис. 5.52.г).

В случае необходимости аналоговый сигнал легко преобразуется в цифровую форму при помощи компаратора.

Основные параметры датчиков скорости вращения определяются параметрами используемых в них преобразователей магнитного поля.

Датчики счета зубьев с применением «монолитных» магниторезисторов

Наибольшее распространение получили магнитные датчики скорости вращения зубчатых колес, реализованные с применением дифференциальных «монолитных» магниторезисторов. Схема, поясняющая принцип работы такого датчика, приведена на рис. 5.53.

Наибольшее распространение в качестве датчиков скорости вращения зубчатых колес получили «монолитные» магниторезисторы с встроенными постоянными магнитами. На рис. 5.54 в качестве примера приведен внешний вид дифференциального «монолитного» магниторезистора типа FP210L 100-2, выпускаемого фирмой Siemens, а в таблице 5.9 приведены основные параметры датчика.

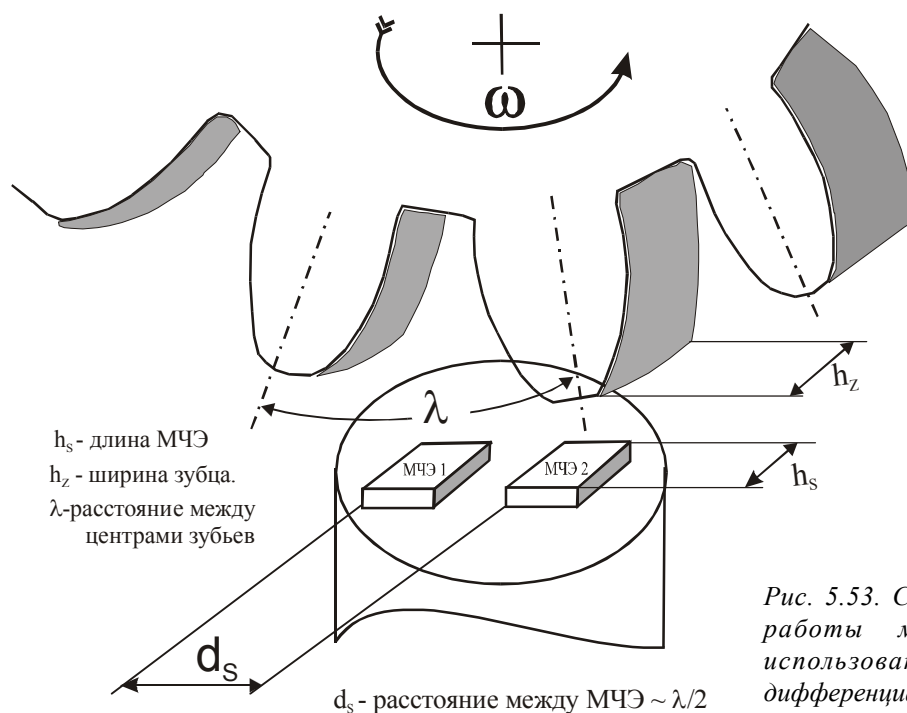


Рис. 5.53. Схема, поясняющая принцип работы магнитного датчика с использованием «монокристаллического» дифференциального магниторезистора

Рис. 5. 54 Внешний вид и габариты датчика типа FP210L 100-2 , реализованного с использованием дифференциального «монокристаллического» магниторезистора

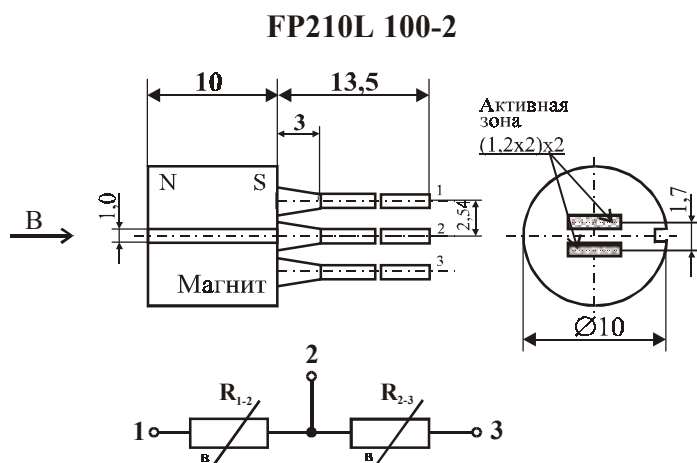


Таблица 5.9. Основные параметры «монокристаллического» магниторезистора типа FP210L 100-2

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 5 до 7,5
2	Ток потребления, мА, не более	от 13 до 34
3	Сопротивление одного плеча ($R_1=R_2$), Ом	110...190
4	Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ.MR}}$ при $V=1$	$> 0,85$
5	Диапазон рабочих температур, $^{\circ}\text{C}$	-20...+100
6	Габаритные размеры, мм	Ø 10 x 10

На рис. 5.55.а приведён один из вариантов использования «монокристаллического» магниторезистора типа FP210L 100-2 в качестве датчика скорости вращения зубчатых колес, рекомендованный изготовителем МД - фирмой Siemens.

При использовании магниторезисторов, их включают в полумост или мост. При включении в полумост на магниторезистор (R_1+R_2) подается напряжение питания $U_{\text{п}}=5\text{В}$. С выводов 2 и 3 датчика снимается аналоговый сигнал, который зависит от зазора δ между зубчатым колесом и магниточувствительным элементом датчика. Зависимость напряжения сигнала датчика $U_{\text{ВЫХ.MR}}$ от величины рабочего зазора δ приведена в таблице. 5.10.

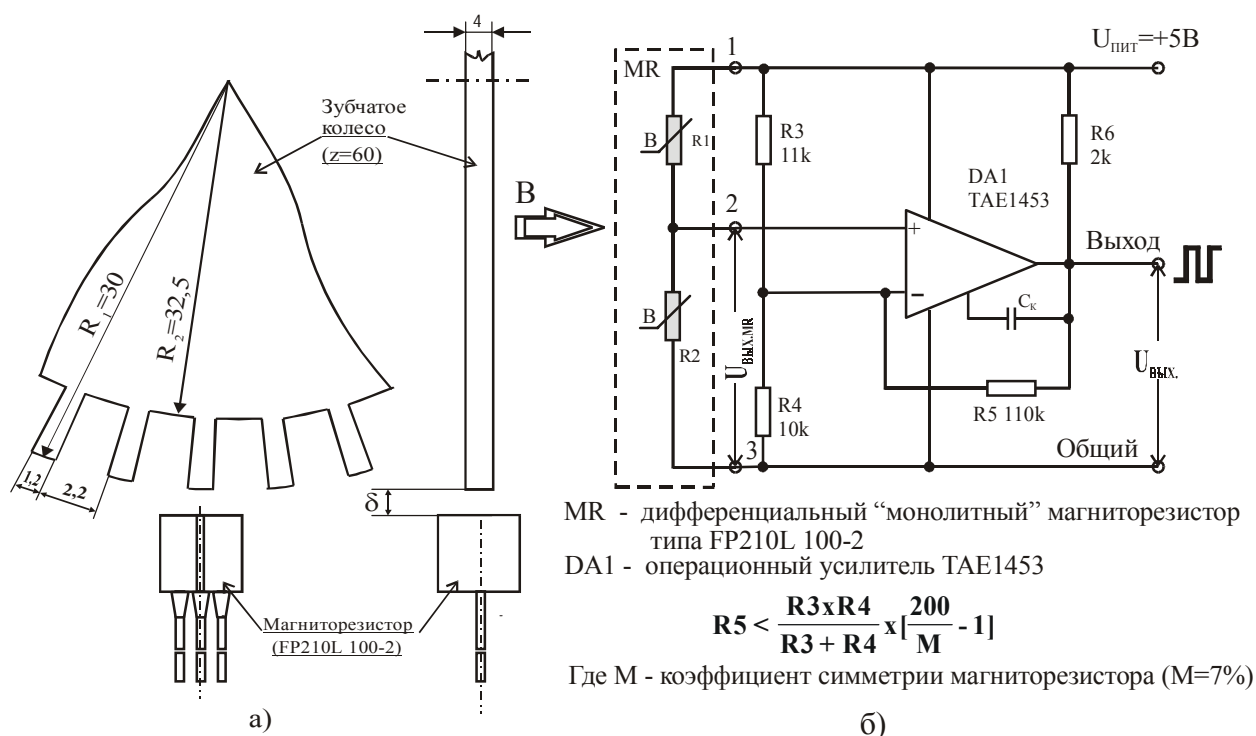


Рис. 5.55. Вариант применения «монолитного» магниторезистора в качестве датчика скорости вращения зубчатого колеса: а - схема размещения; б - электрическая схема преобразования аналогового сигнала датчика в цифровой

Таблица 5.10. Зависимость аналогового сигнала на выходе датчика от величины рабочего зазора

Рабочий зазор, δ, мм	Основной сигнал U _{ВЫХ.МР}		Напряжение 1-ой гармоники U _{ВЫХ.1}		Напряжение 2-ой гармоники U _{ВЫХ.2}	
	мВ	%	мВ	%	мВ	%
0.02	540	100	50	9	30	5,6
0.2	210	100	7	3,3	5	2,3
0.4	100	100	2	2	1	1
0.6	50	100	0,7	1,5	0,2	0,4

При необходимости преобразования аналогового сигнала в цифровую форму может быть использована схема, приведенная на рис. 5.55.б.

Частота (f) вращения (шестерни или вала и т.п.) определяется по формуле:

$$f = \frac{(z \times n)}{60} \quad (5.15)$$

где n – число оборотов шестерни, об/мин;
 z – количество зубьев.

Сигнал на выходе моста зависит от величины рабочего зазора и от расстояния между зубцами шестерни.

На рис. 5.56. приведены характерные зависимости сигнала на выходе «монолитных» магниторезисторов серий FP и KSY от расстояния между центрами зубьев ферромагнитной шестерни. Магниторезисторы выпускаются фирмой Siemens специально для использования их в качестве датчиков скорости вращения зубчатых колес.[49, 50]

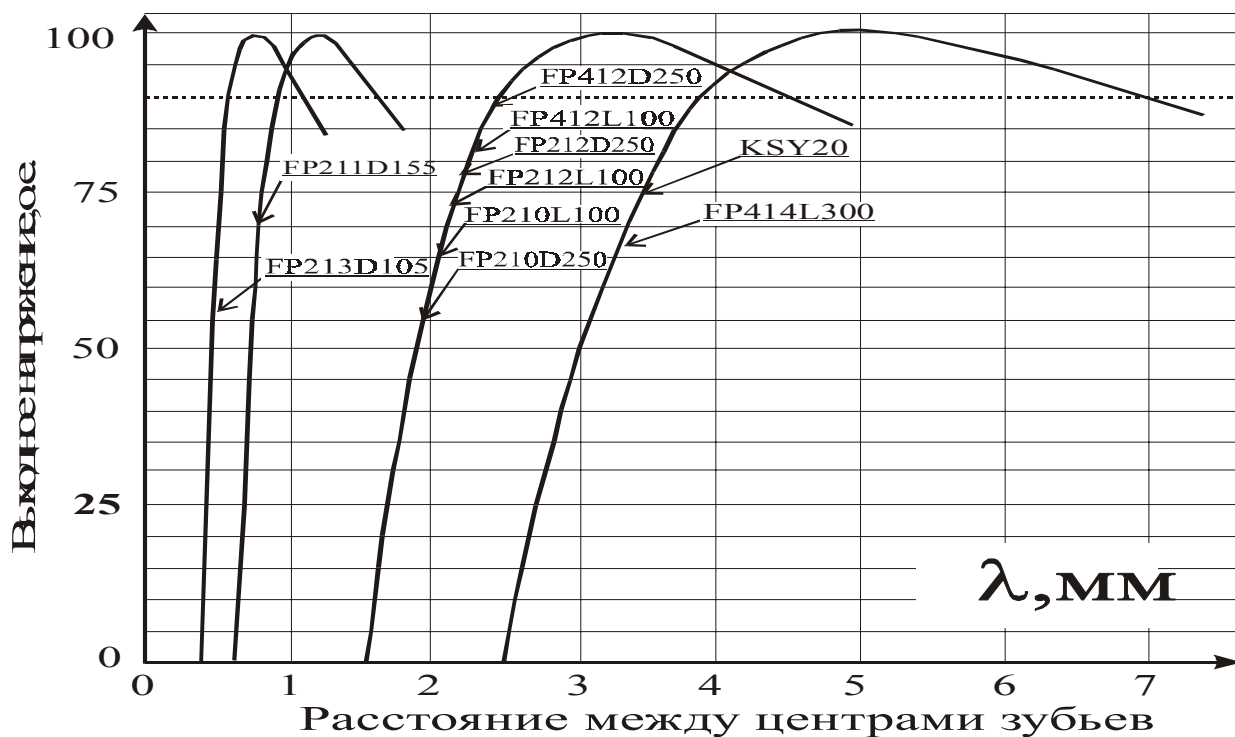


Рис. 5.56. Зависимость сигнала магниторезисторных датчиков от расстояния между центрами зубьев ферромагнитной шестерни

Основные параметры некоторых типов датчиков скорости вращения зубчатых колес, выпускаемых ведущими зарубежными производителями с использованием магниторезисторов, приводятся в главе 16 тома 2.

Датчики счета зубьев с применением элементов Холла и МУМ

Достаточно широкое распространение получили датчики скорости вращения зубчатых колес, использующие в качестве ПМП дискретные элементы Холла и магнитоуправляемые интегральные схемы. На рис. 5.57 в качестве приведена электрическая схема такого датчика. Схема не требует особых пояснений.

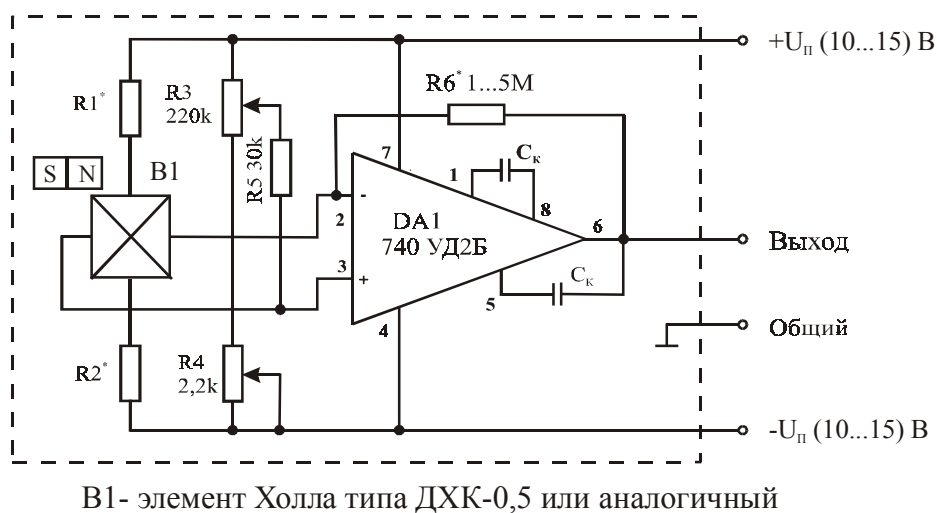


Рис. 5.57. Принципиальная электрическая схема датчика скорости вращения зубчатых колес с применением элемента Холла

На рис. 5.58. дана конструкция и электрическая схема датчика скорости вращения типа 1GT101DC, реализованного на основе магнитоуправляемой ИС. В табл. 5.11 приведены основные параметры этого датчика.

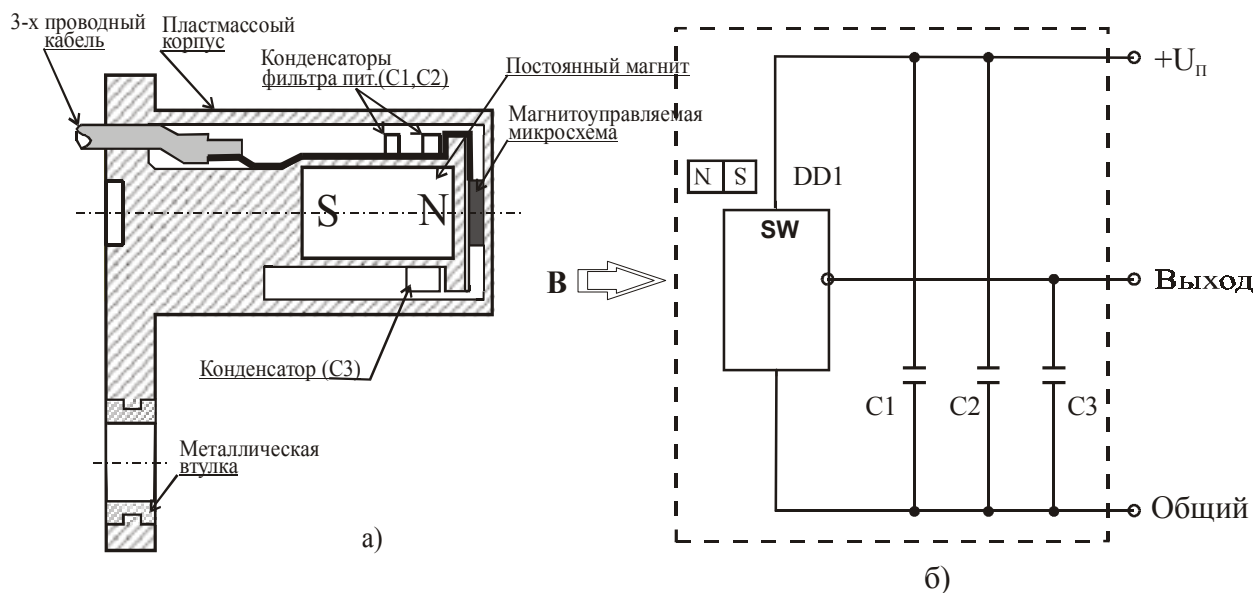


Рис. 5.58. Датчик скорости вращения типа 1GT101DC: а - конструкция; б - электрическая схема

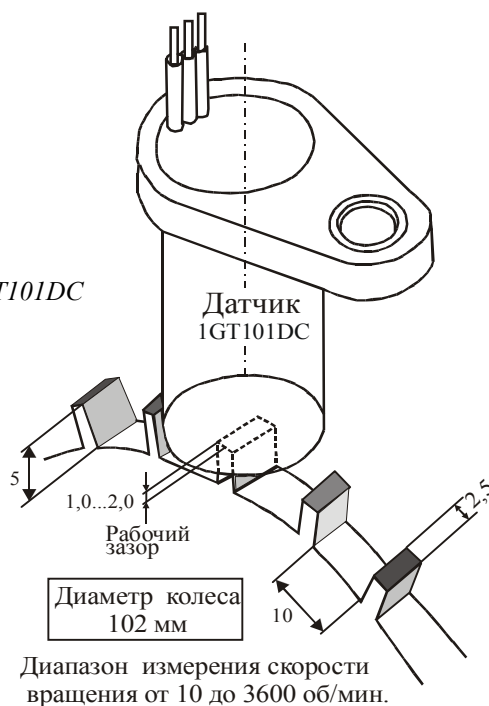
Таблица 5.11. Основные параметры датчика типа 1GT101DC (фирма Honeywell)

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 4,5 до 24
2	Ток потребления, мА, не более	от 10 до 20
3	Ток коммутации, мА, не более	40
4	Постоянная времени, мкс	15
5	Рабочий зазор, мм	от 1,02 до 2,03
6	Точка срабатывания, градусов	$3,7 \pm 1,25$
7	Точка отпускания, градусов	$4,7 \pm 2,5$
8	Точка срабатывания, мм	$3,28 \pm 1,13$
9	Точка отпускания, мм	$4,16 \pm 2,21$
10	Диапазон рабочих температур, °C	-40...+150
11	Габаритные размеры, мм	$\varnothing 17,9 \times 36,4 \times 37$

На рис. 5.59 в качестве примера приведен вариант применения датчика скорости вращения зубчатых колес с использованием МУМ.

Рис. 5.59. Вариант применения датчика скорости типа 1GT101DC

На выходе датчика 1GT101DC вырабатывается стандартный сигнал в виде логического «0» или «1».



Датчики скорости вращения повышенной точности

Для решения более сложных технических задач, требующих высокого геометрического разрешения, используют специальные датчики с применением элементов Холла и магнитоуправляемых ИС на их основе. Электронные схемы таких устройств отличаются высокой степенью сложности.

Фирмой Allegro (США) специально для высококачественных устройств измерения скорости вращения зубчатых колес и скорости перемещения прямозубых и косозубых реек выпускается серия (ATS) магнитных датчиков. [31, 33, 34, 44, 53]

На рис. 5.60 в качестве примера приведена функциональная схема магнитного датчика типа ATS640JSB, а на рис. 5.61 приведен внешний вид и габаритные размеры этого датчика.

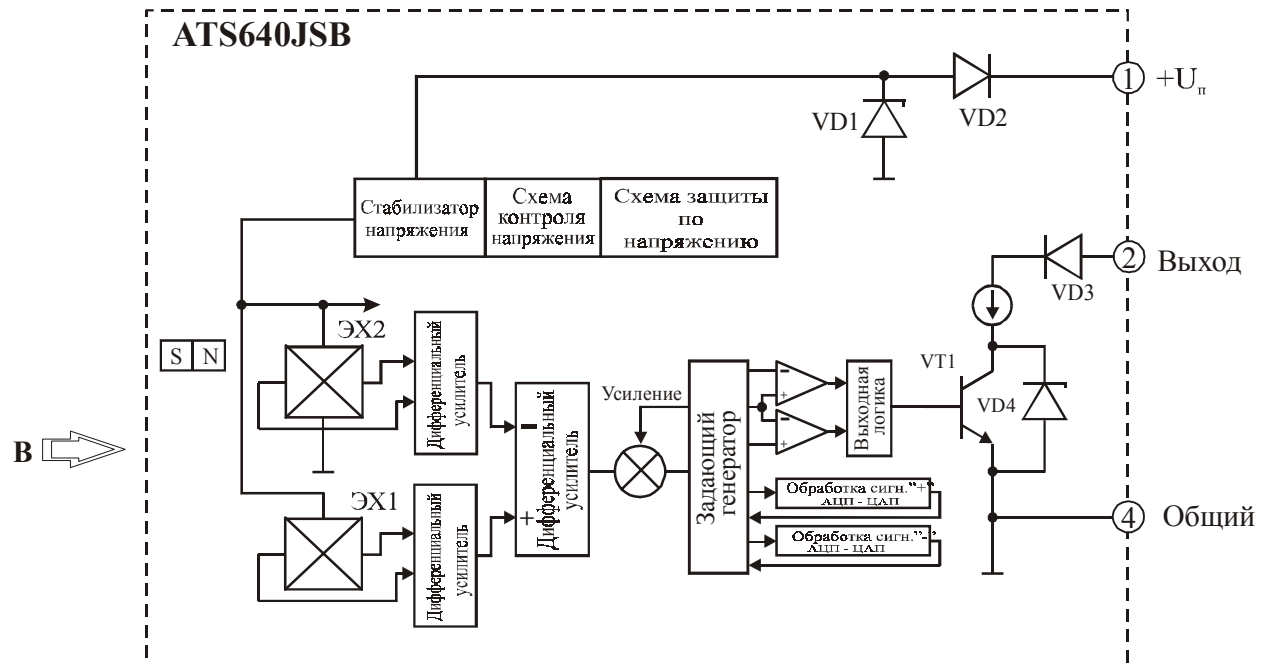


Рис. 5.60. Упрощенная функциональная схема магнитного датчика типа ATS640JSB

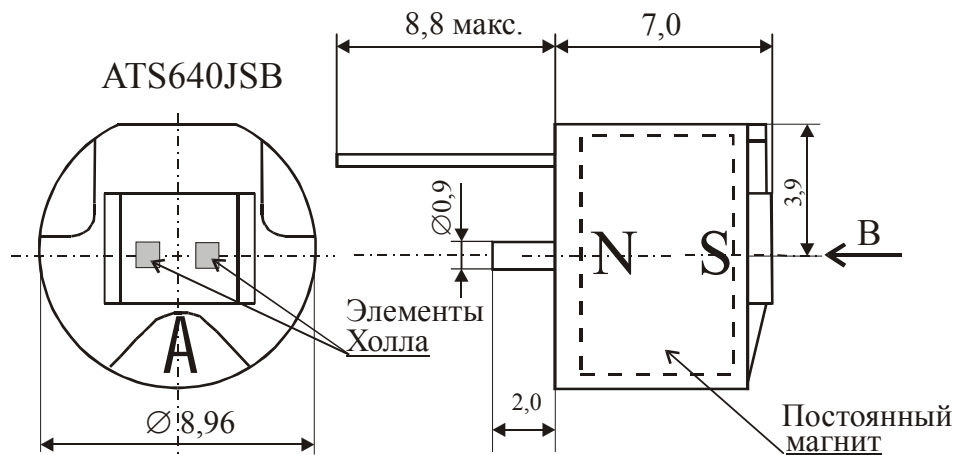


Рис. 5.61. Внешний вид и габариты магнитного датчика типа ATS640JSB

Датчик ATS640JSB имеет два элемента Холла, расположенных в одной плоскости на расстоянии 2,23 мм друг от друга, сложную электронную схему и весьма совершенную магнитную систему на основе ПМ из сплава «самарий-кобальт».

Для повышения чувствительности, разрешающей способности и точности срабатывания МУМ, как правило, используется дифференциальное включение ЭХ, когда каждый из элементов реагирует на заданную полярность источника управляющего магнитного поля.

Электронной схемой датчика предусмотрена цифровая обработка сигнала с применением сложного самокалибрующегося процессора, замкнутая система АРУ «самонастройка» на край зубца. Кроме того, схема прибора предусматривает температурную компенсацию изменения параметров, а также защиту от перенапряжения и обратной полярности источника питания.

На выходе датчика вырабатывается стандартный сигнал в виде логического «0» или «1». Датчик может использоваться в 2-х проводном режиме (См. рис. 5.62).

Основные параметры датчиков типа ATS640JSB приведены в таблице 5.12.

Таблице 5.12. Основные параметры датчиков типа ATS640JSB

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 4,25 до 26 26,5 (для 2-х пров.)
2	Ток потребления, мА, не более	9...15
3	Ток коммутации, мА, не более	50
4	Постоянная времени, мкс	200
5	Рабочий зазор, мм	0,4...2,5
6	Точность срабатывания, градусов	$\pm(0,25-0,5)$
7	Диапазон рабочих температур, °C	-40...+115
8	Габаритные размеры, мм	Ø 9 x 7

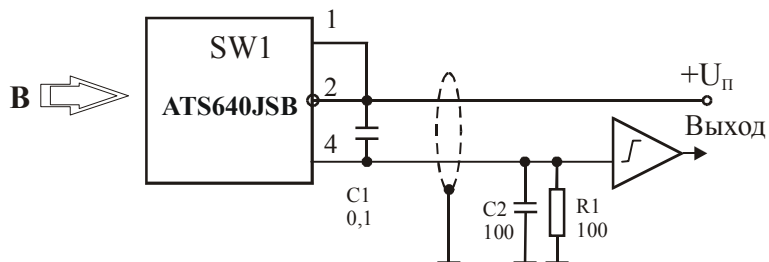


Рис. 5.62. Схема включения датчика ATS640JSB в 2-х проводном режиме

Определенный интерес представляют программируемые датчики приближения повышенной точности ATS535CSB и ATS535JSB также предназначенные для измерения скорости вращения зубчатых колес и скорости перемещения прямозубых и косозубых реек. Основные параметры датчиков приведены в таблице 5.13.

Приборы отличаются только диапазоном рабочих температур, которая для датчика ATS535CSB составляет от 0 до +70 °C, а для ATS535JSB - от -40 до +115°C.

Функциональная схема датчика приведена на рис. 5.63, а внешний вид на рис. 5.64.

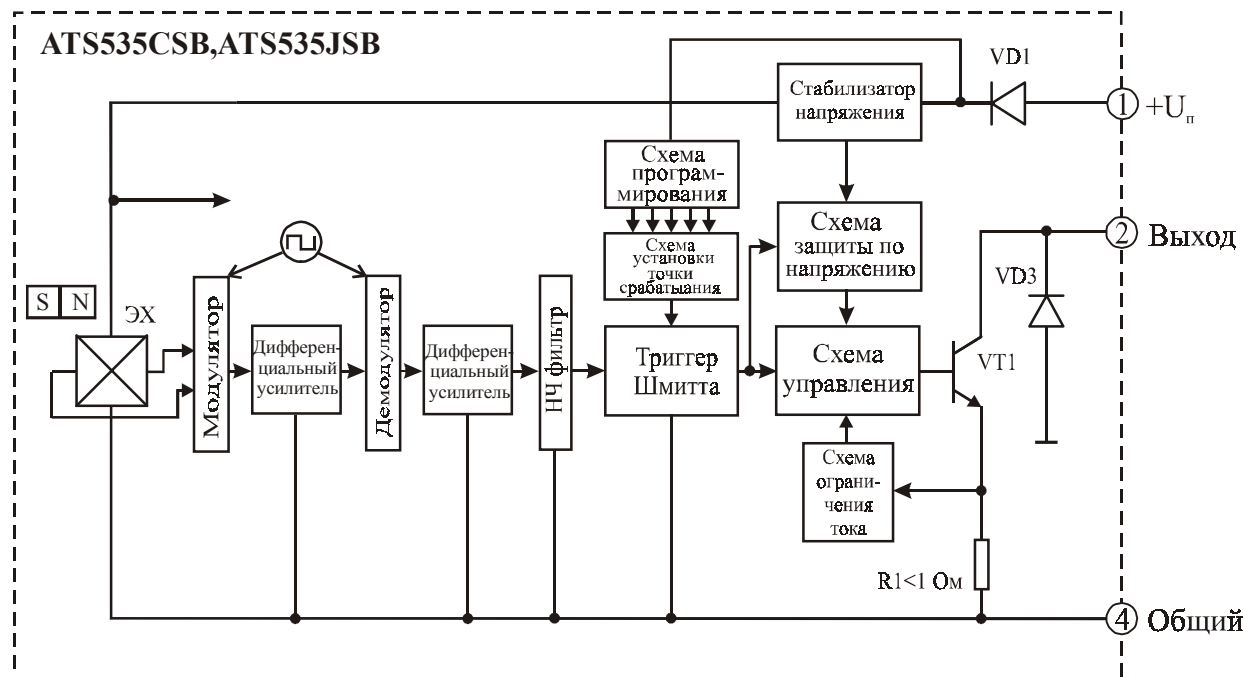


Рис. 5.63. Упрощенная функциональная схема датчика типа ATS535CSB

Датчик содержит один элемент Холла и схему обработки сигнала с его «модуляцией - демодуляцией», а также постоянный магнит на основе сплава «самарий-ко-балът».

Схемы приборов предусматривают также температурную компенсацию изменения параметров, а также защиту от перенапряжения и обратной полярности источника питания.

Однако главная особенность указанных приборов заключается в возможности дистанционного программирования точки срабатывания после выбора оптимального рабочего зазора.

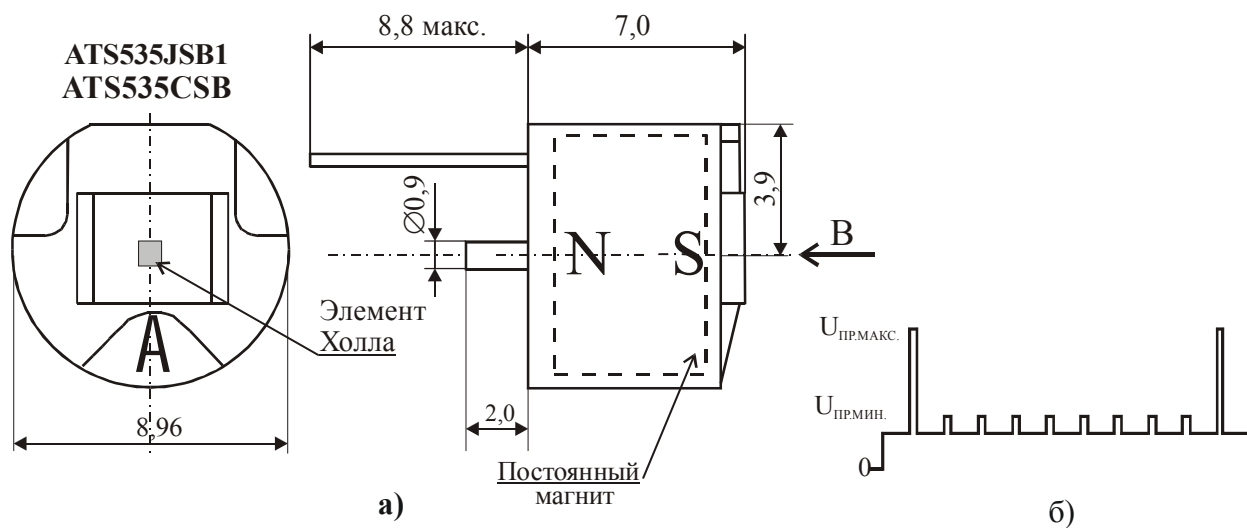


Рис. 5.64. Датчик типа ATS535: а - внешний вид; б - пример диаграммы протокола программирования

Программирование точки срабатывания датчика типа ATS535 осуществляется путем подачи по цепи питания датчика (вывод 1) специального кодированного сигнала (рис. 5.66.б). (Подробнее см. [31])

Таблица 5.13. Основные параметры датчиков ATS535

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 4,25 до 26
2	Ток потребления, мА, не более	от 4 до 8
3	Ток коммутации, мА, не более	100
4	Постоянная времени, мкс	200
5	Рабочий зазор, мм	0,4...2,25
6	Точность срабатывания, градусов	$\pm(0,5...1,0)$
7	Диапазон рабочих температур, °C	0...+75 (ATS535CSB) -40...+115 (ATS535JSB)
8	Габаритные размеры, мм	$\varnothing 9 \times 7$

Основные параметры некоторых типов датчиков скорости вращения зубчатых колес, выпускаемых ведущими зарубежными производителями с использованием МУМ, также приводятся в главе 16 тома 2.

5.4.2. Датчики скорости вращения, основанные на считывании магнитного поля полюсов многополюсных магнитов

В этих датчиках в качестве модулятора используются диски с набором постоянных магнитов, расположенных на окружности, а также магнитные диски с отверстиями и немагнитные диски с магнитными вставками. Модулятор закрепляется на оси контролируемого объекта.

Устройство таких датчиков, в принципе, не отличается от датчиков счета зубьев шестеренок. Кроме того, для этих целей могут использоваться магнитные датчики не содержащие смещающих магнитов, в том числе датчики положения, датчики приближения, а также магнитоуправляемые интегральные схемы и т.д.

Для получения необходимой разрешающей способности выпускаются кольцевые магниты с 2, 4, 8, 10, 16, 20, 30 и более парами полюсов. Для повышения геометрической разрешающей способности ДСВ полюса магнита делают узкими в направлении, перпендикулярном оси вращения.

Наиболее широко используются цифровые датчики, формирующие на выходе знакопеременный или стандартный («0» - «1») сигнал при каждой смене полярности вращающегося постоянного многополюсного магнита.

Выходной сигнал подается в программируемый счетчик, который регистрирует величину угла или пройденного пути. Для измерения числа оборотов используют счетчик частоты, который показывает число оборотов непосредственно в 1/мин. Например, кольцевые магниты с 30 парами полюсов при каждом обороте обеспечивают получение 60 импульсов, что дает возможность измерять даже очень малые числа оборотов.

Частота вращения (вала, барабана и т.п.) определяется по формуле:

$$f = \frac{(p \times n)}{60} \quad (5.16)$$

где p – количество полюсов многополюсного постоянного магнита;

n – число оборотов многополюсного магнита, об/мин.

Датчики счета полюсов с применением магниторезисторов

Наибольшей геометрической разрешающей способностью обладают ДСВ в качестве магниточувствительных элементов которых используются тонкопленочные магниторезисторы на основе ферромагнитных пленок (ФМП).

При помощи таких датчиков по взаимному расположению постоянного магнита и МЧЭ можно фиксировать изменение состояния вращения, начиная с движения из состояния покоя и вплоть до вращения на очень высоких скоростях.

Для тонкопленочного магниторезистора магнитная цепь упрощается, поскольку магнитное смещение можно налагать перпендикулярно поверхности элемента.

В таких случаях, как правило, применяют многополюсный постоянный магнит (МПП) цилиндрической формы, закрепляемый на оси объекта, частота вращения которого измеряется. Дифференциальный магниторезистор располагают вблизи боковой поверхности магнита-модулятора.

При вращении этого магнита и прохождения вблизи МЧЭ двух соседних магнитных элементов с разноименными полюсами воздействующее на элемент магнитное поле изменяется в следующей последовательности от +Н до 0 и от 0 до – Н. При этом имеет место пиковое изменение сопротивления магниточувствительного элемента.

Наиболее широко известны три возможных варианта расположения МЧЭ относительно рабочей поверхности магнита-модулятора. Рассмотрим три возможные схемы построения такого преобразователя частоты вращения, показанные на рис. 5.65...5.67.

Анализ данных вариантов расположения магниточувствительных элементов относительно рабочей поверхности многополюсного магнита, показал, что наиболее оптимальным является вариант 3, приведенный на рис. 5.67 (направление магнитного поля изменяется в плоскости Y-Z, перпендикулярной направлению электрического тока I в МЧЭ).

Основные преимущества варианта 3 (рис. 5.67) перед вариантами 1 и 2 (рис. 5.65 и 5.66) следующие:

- возможность использования минимальных зазоров между элементами многополюсного магнита и МЧЭ;
- высокая однородность магнитного поля по длине элемента;
- высокая точность регистрации положения МПП и связанной с ним оси.

На рис. 5.68.а показано устройство датчика скорости вращения, выполненного по варианту 3 и содержащего два магниточувствительных элемента (R_1 и R_2), включённых в виде полумоста, питаемого от источника постоянного напряжения $U_{\text{п}}$.

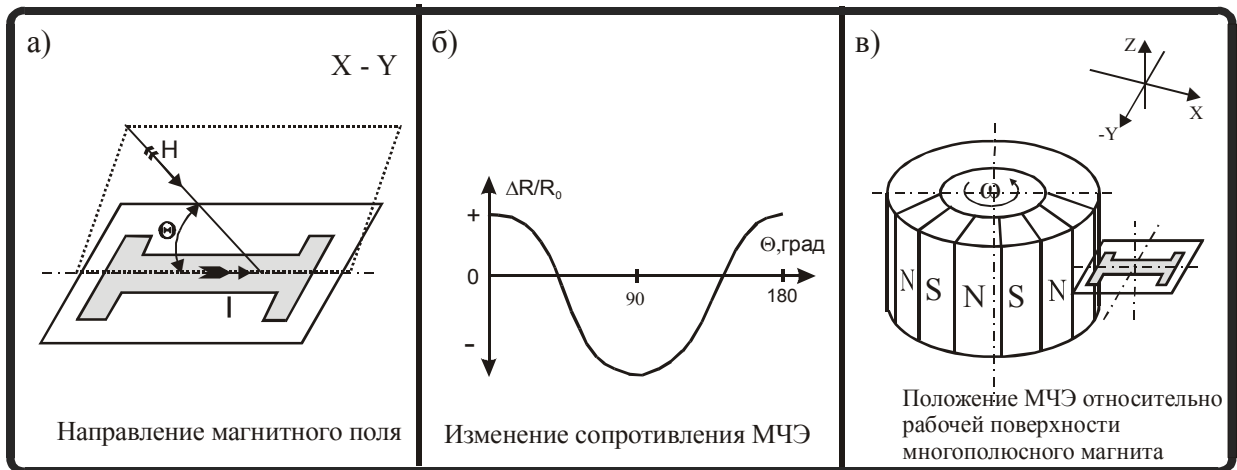


Рис. 5.65. Вариант построения узла преобразователя скорости вращения с применением тонкоплёночного магниторезистора расположенного осью X-Y перпендикулярно образующей плоскости многополюсного магнита: а - направление магнитного поля и управляющего тока; б - зависимость сопротивления МЧЭ от вектора напряженности магнитного поля; в - положение МЧЭ относительно рабочей поверхности многополюсного магнита-модулятора

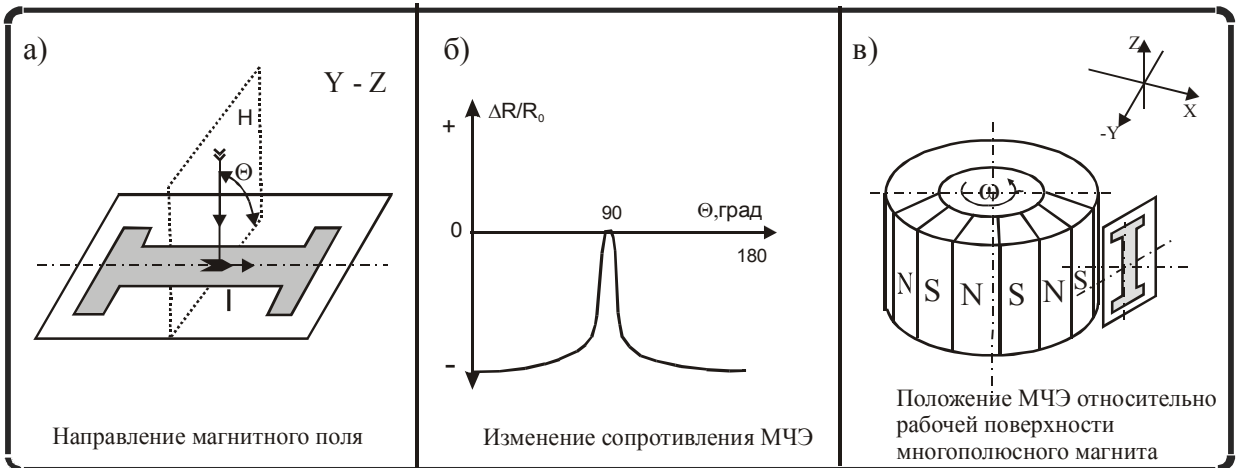


Рис. 5.66. Вариант построения узла преобразователя скорости вращения с применением тонкоплёночного магниторезистора расположенного осью X-Z перпендикулярно образующей плоскости многополюсного магнита: а - направление магнитного поля и управляющего тока; б - зависимость сопротивления МЧЭ от вектора напряженности магнитного поля; в - положение МЧЭ относительно рабочей поверхности многополюсного магнита-модулятора

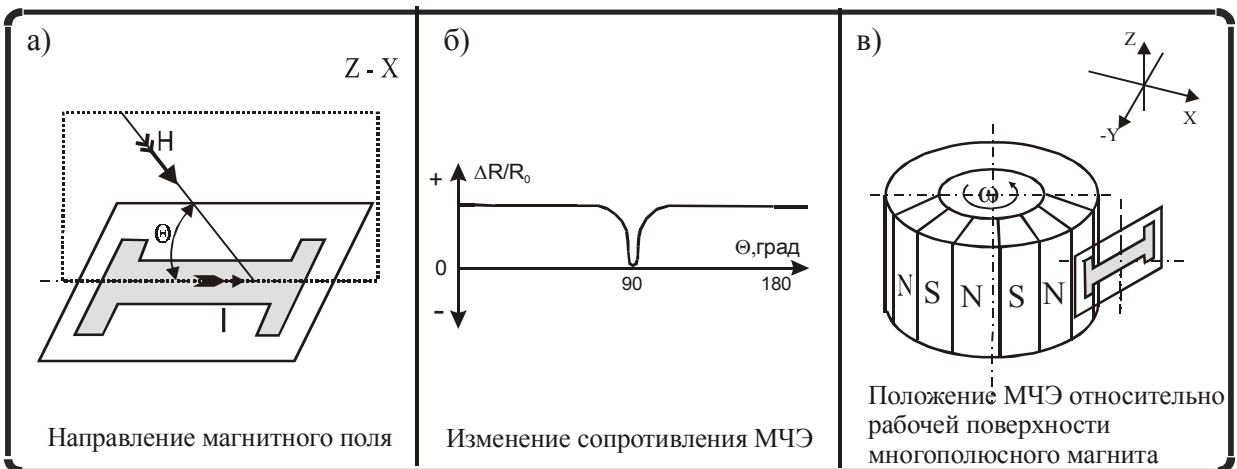


Рис. 5.67. Вариант построения узла преобразователя скорости вращения с применением тонкоплёночного магниторезистора расположенного осью Y-Z перпендикулярно образующей плоскости многополюсного магнита: а - направление магнитного поля и управляющего тока; б - зависимость сопротивления МЧЭ от вектора напряженности магнитного поля; в - положение МЧЭ относительно рабочей поверхности многополюсного магнита-модулятора

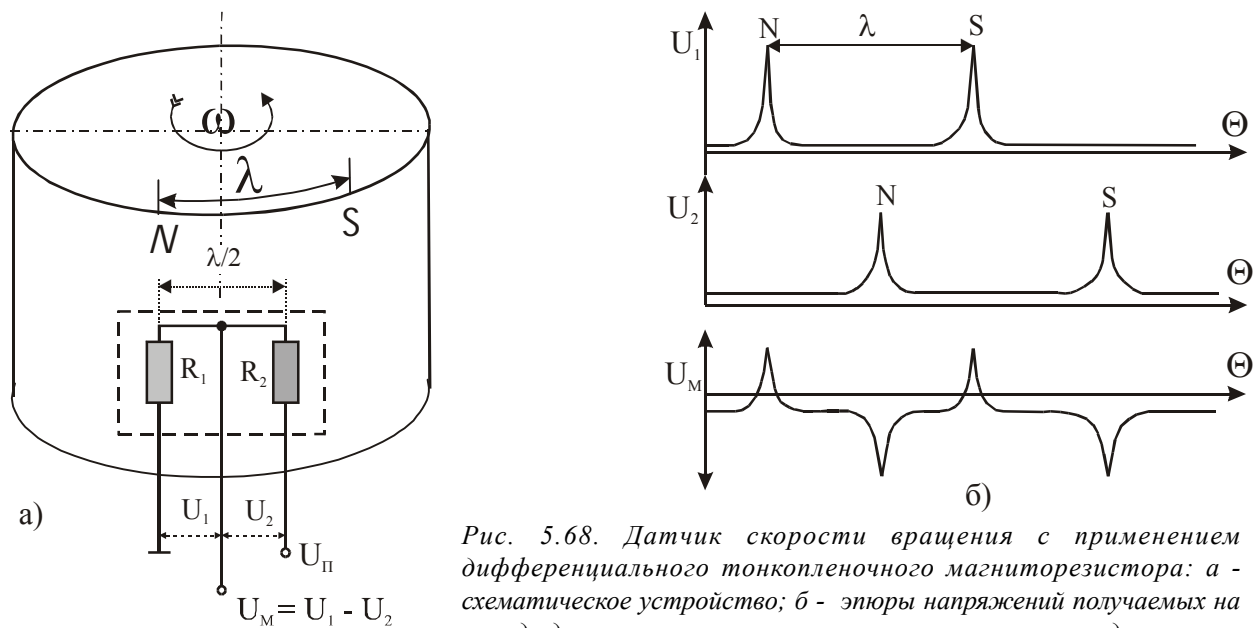


Рис. 5.68. Датчик скорости вращения с применением дифференциального тонкопленочного магниторезистора: а - схематическое устройство; б - эюры напряжений получаемых на выходе датчика при различных положениях магнита-модулятора

На рис. 5.68.б показаны графики электрических напряжений в различных точках схемы преобразователя, получаемых при вращении многополюсного постоянного магнита (МПМ) с постоянной частотой ω . Магниточувствительные элементы R_1 и R_2 устанавливаются один относительно другого на расстоянии, равном $\lambda/2$, т.е. равном половине расстояния между полюсами магнита.

При вращении магнита сопротивление МЧЭ увеличивается до максимальных значений при установлении против них соответствующих магнитных элементов МПМ (с ближайшими к ним полюсами N или S).

Выходное напряжение полумоста, равное $U_M = U_1 - U_2$, поступает на электронную схему, на выходе которой формируются стандартные импульсы прямоугольной формы.

В таблице 5.14 в качестве примера приведены параметры двух аналогичных датчика скорости вращения, выполненных с использованием тонкопленочных дифференциальных магниторезисторов. На рис. 5.69 приведен его внешний вид и габаритные размеры отечественного датчика типа Ав-1.

Следует отметить следующее. Так как плотность магнитного потока изменяется по синусоиде, то при использовании аналогичного линейного датчика можно использовать его в качестве датчика угла поворота. При этом можно различать также и углы, меньшие угла, ограниченного парой полюсов.

Таблица 5.14. Основные параметры датчиков скорости вращения, выполненных с использованием тонкопленочных дифференциальных магниторезисторов

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип датчика / значение параметра	
		Ав-1 (Россия)	«Panasonic» (Япония)
1	Напряжение питания, В	$9 \pm 0,5$	$9 \pm 0,5$
2	Ток потребления, мА, не более	4	4
3	Начальное сопротивление R_0 при 20°C , Ом	2×1200	2×1200
4	Выходное напряжение, мВ (при рабочем зазоре δ , мм)	$40 \dots 105$ (-0,035) $15 \dots 55$ (0,17)	$40 \dots 105$ (-0,035) $15 \dots 55$ (0,17)
5	Температурный коэффициент сопротивления при изменении индукции магнитного поля на 20 мТл, % на градус	-0,035	-0,035
6	Температурный уход точки срабатывания /отпускания, мкм / $^\circ \text{C}$, не более	$0,4 \dots 2,4$	$0,6 \dots 2,4$
7	Диапазон рабочих частот, МГц	$0 \dots 1,0$	$0 \dots 1,0$
8	Ширина элемента многополюсного магнита,	$0,3 \dots 0,5$	$0,3 \dots 0,5$
9	Индукция магнитного поля на поверхности диска-модулятора, мТл, не менее	20	20
10	Габаритные размеры, мм ³	$3,3 \times 3 \times 7$	$3,3 \times 3 \times 7$
11	Масса, г, не более	1,5	1,5
12	Диапазон рабочих температур, $^\circ \text{C}$	$+10 \dots +40$	$-10 \dots +80$

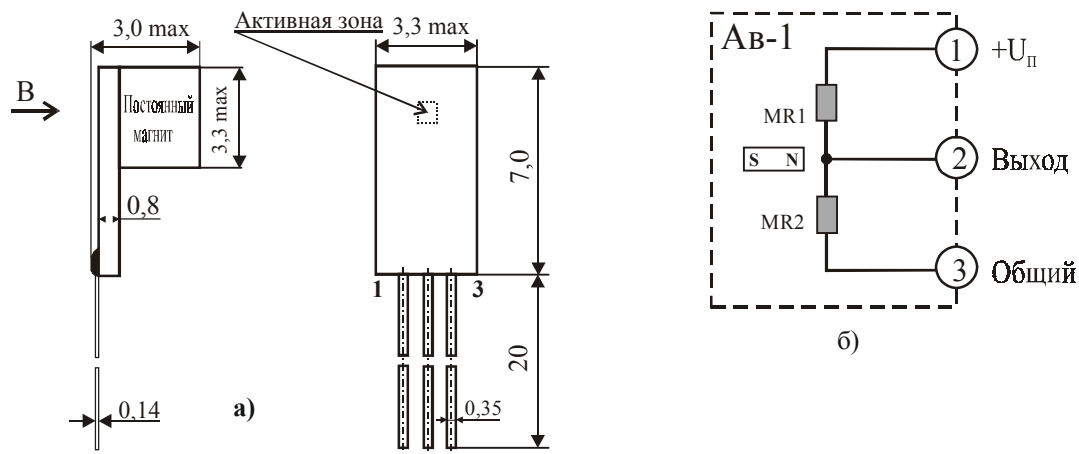


Рис. 5.69. Датчик скорости вращения типа Ав-1: а - внешний вид; б - электрическая схема

В работе [3] производилось сравнение преобразователей на основе тонкоплёночных магниторезисторов с другими импульсными преобразователями частоты вращения, наиболее широко применяемыми в технике. В их число входили: фотоэлектрический, ёмкостной, индукционный преобразователи, также МЧЭ на основе элемента Холла и «язычковый» механический преобразователь (геркон).

Преобразователи сравнивались по следующим показателям: разрешающая способность (определяемая максимальным числом входных импульсов за один оборот рабочей оси); возможность измерения низких частот вращения; стойкость к воздействию внешних механических и климатических факторов; диапазон рабочих температур и стоимость.

По результатам исследований было доказано, что по совокупности всех приведенных показателей, преобразователь с применением тонкоплёночного магниторезистора превосходит остальные типы ПМП.

Датчики счета полюсов ПМ с применением магнитоуправляемых ИС

Для измерения скорости вращения валов в различных устройствах общего применения наиболее широко используют магнитные датчики, реализованные на основе магнитоуправляемых интегральных схем или сами МУМ (см. гл. 3). Такие датчики генерируют на выходе стандартный цифровой сигнал и хорошо совмещаются с ТТЛ, КМОП и другими логическими схемами. Эти датчики, как правило, не содержат постоянных магнитов.

Принцип работы датчиков иллюстрируется на рис.5.70.

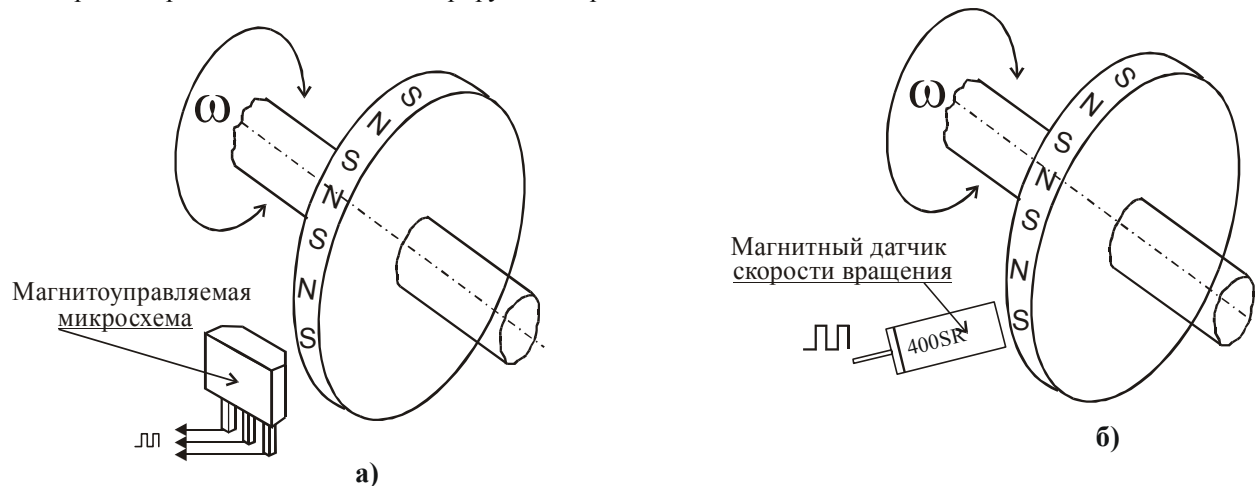


Рис. 5.70. Принцип работы датчиков скорости вращения многополюсных магнитов:

а - с использованием МУМ; б - с применением датчика типа 400SR

На рис. 5.71 приведен внешний вид датчика 413SR10, а в таблице 5.15 приведены его основные параметры.

Рис. 5.71. Внешний вид датчика типа 413SR10 (Фирма Honeywell)

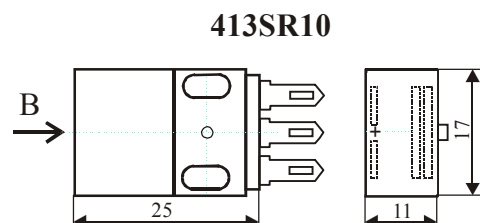


Таблица 5.15. Основные параметры датчика скорости вращения многополюсного магнита типа 413SR10

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 6 до 24
2	Ток потребления, мА	13 (тип.)
3	Ток коммутации, мА	20
4	Индукция срабатывания (при 25 ⁰ С),	40
5	Индукция отпускания (при 25 ⁰	30
6	Гистерезис (при 25 ⁰ С), мТл	10
7	Точность срабатывания	Не нормируется
8	Диапазон рабочих частот, кГц	0...100
9	Диапазон рабочих температур, ⁰ С	-45...+150
10	Габаритные размеры, мм	25 x 11x 17

При использовании датчиков серии 400SR можно измерять не только скорость вращения, но одновременно и угол поворота вала. На рис. 5.72 схематически изображена конструкция такого магнитоэлектронного устройства.

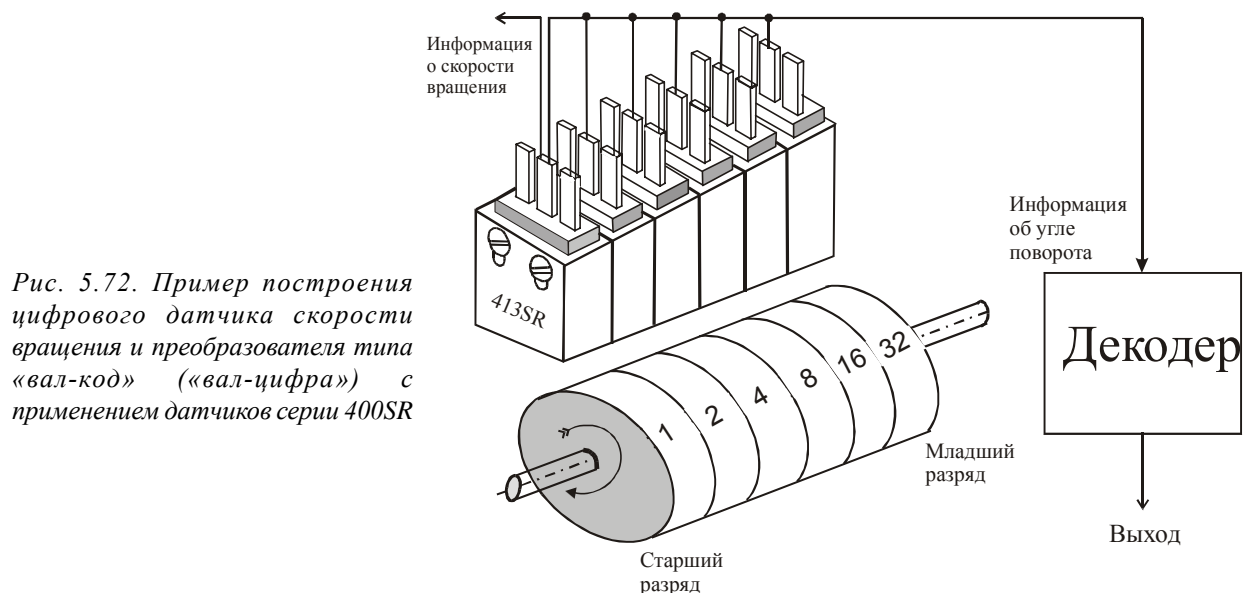


Рис. 5.72. Пример построения цифрового датчика скорости вращения и преобразователя типа «вал-код» («вал-цифра») с применением датчиков серии 400SR

Устройство состоит из набора магнитных датчиков 400SR фирмы Honeywell и 6-ти разрядного кодового магнитного барабана, установленного на валу контролируемого электродвигателя.

Барабан представляет собой набор из 6-ти кольцевых магнитов. В зависимости от разряда на рабочей поверхности кольца может быть сформировано от одной до 32 пар N-S полюсов.

Каждая пара полюсов приводит в действие отдельный магнитный датчик, который регистрирует перемещение полюса импульсным сигналом.

За один полный оборот барабана (360°), каждый из датчиков выдает соответственно 1, 2, 4, 8, 16 или 32 импульса.

Суммарный сигнал с выхода 6-ти датчиков представляет собой информацию об угле поворота, представленную в двоичном коде. Эта информация поступает на дешифратор и используется по назначению. Информация о скорости вращения вала может сниматься с датчика старшего разряда.

Угловое разрешение устройства составляет 5,6° при погрешности определения угла порядка 2%.

В качестве кодового барабана могут использоваться и специальные диски с «нанесённым» магнитным рисунком, представляющим специальные коды. (Например, нормальный код, код Грея, коды с переменным весом разряда и др.). [1, 5, 37]

Магнитные датчики скорости вращения отличаются высоким быстродействием, не боятся ни грязи, ни влаги и, в отличие от индуктивных датчиков, дают сигнал прямоугольной формы, не зависящий от числа оборотов ни по форме, ни по амплитуде, ни по фазе.

5.4.3. Датчики скорости вращения, использующие вихревые токи

При использовании преобразователей магнитного поля можно измерять скорость вращения объектов из немагнитных металлов.

Метод измерения основан на использовании вихревых токов, возникающих в пластинах из электропроводящего материала при движении их в магнитном поле.

Возникновение вихревых токов, пропорциональных частоте вращения токопроводящей пластины в магнитном поле, вызывает изменение последнего. Это изменение результирующего магнитного поля может, например, измеряться при помощи одного или двух дифференциальных магниторезисторов и преобразовываться в электрический сигнал, пропорциональный частоте вращения (или скорости линейного перемещения) проводящей пластины.

На рис. 5.73.а показана механическая часть измерителя, в котором реализован указанный выше метод

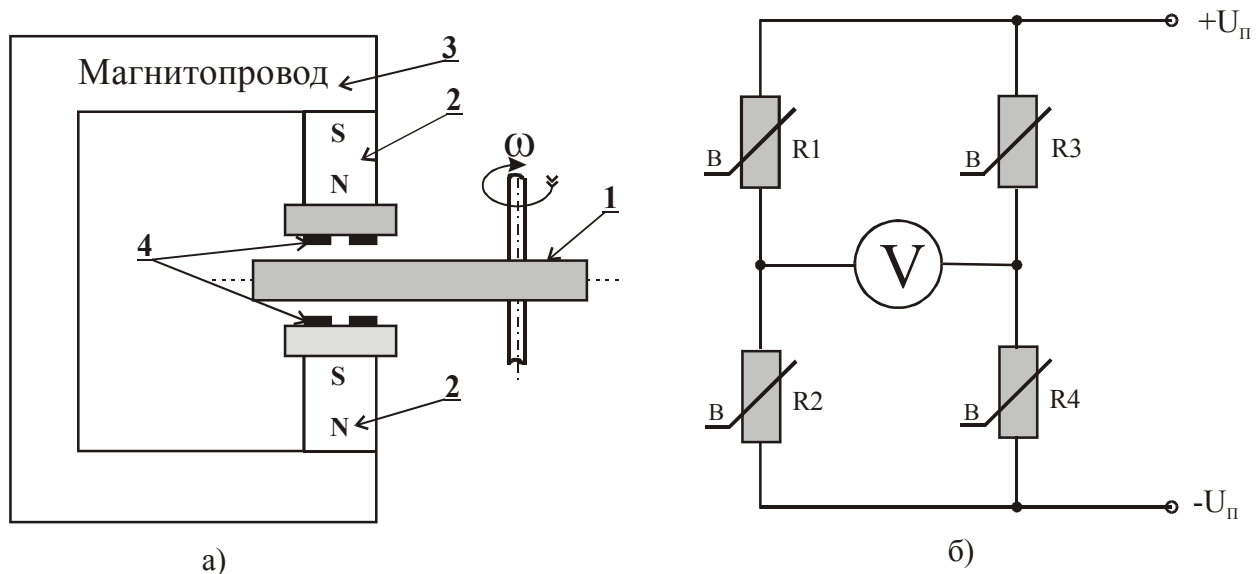


Рис. 5.73. Измеритель частоты вращения, использующий вихревые токи: 1 - диск из проводящего материала; 2 - постоянные магниты; 3 - магнитопровод; 4 - дифференциальные магниторезисторы.

Измеритель частоты вращения работает следующим образом. Диск 1 из алюминия или меди вращается в магнитном поле, созданном магнитной системой из постоянных магнитов 2 и магнитопровода 3. Изменение магнитного поля в воздушном зазоре, вызванное протеканием вихревых токов в диске 1, воспринимается дифференциальными магниторезисторами 4. Последние соединены в неуравновешенную мостовую схему (рис.5.73.б), в диагональ которой включается измерительный прибор V.

Как показано в работе [28], при вращении алюминиевого диска диаметром 70 мм с частотой 3000 об/мин в магнитном поле с индукцией порядка 0,5 Тл сигнал в диагонали моста составляет 160 мВ при напряжении питания ($U_{\text{п}}$), равном 5 В.

Если линейно перемещать в этом поле ту же алюминиевую пластину со скоростью 1 м/с, то напряжение сигнала в диагонали моста составит около 16 мВ.

Если частота вращения вала (или скорость линейного перемещения) непостоянна, то дифференцированием выходного электрического сигнала можно определить значение ускорения.

На рис. 5.74 приведен еще один вариант датчика скорости вращения диска из немагнитного материала, реализованный с применением тонкопленочного резисторного моста типа KMZ10. [12]

Конструкция датчика не требует особых пояснений. Магниторезисторный мост типа KMZ10 используется в типовом режиме (см. гл. 2.2). Датчик измеряет магнитное поле, созданное вихревыми токами, наведенными вращающимся медным диском. Чем быстрее вращается диск, тем больше вихревые токи и выше выходной сигнал датчика.

Основные параметры и характеристики датчиков скорости вращения, выпускаемых наиболее известными производителями, приводятся в главе 16 тома 2.

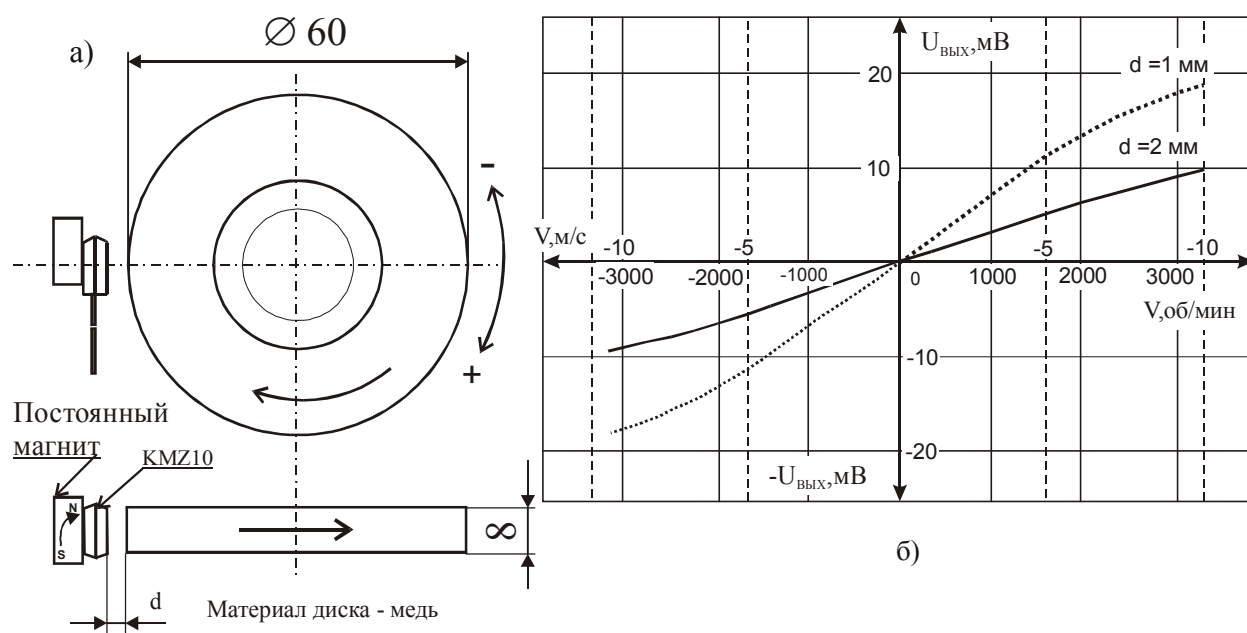


Рис. 5.74. Магнитный датчик скорости вращения медного диска: а - вариант конструкции; б - выходная характеристика

5.5. Магнитные датчики угла наклона

Магнитные датчики угла наклона (Inclinometer) с электрическим выходным сигналом, пропорциональным углу наклона датчика, являются сравнительно новыми приборами, доведенными до широкого промышленного применения лишь в последние годы.

По виду выходного сигнала их можно условно разделить на две группы:

- аналоговые датчики угла (Analog Inclinometer), сигнал на выходе которого пропорционален углу поворота; и
- цифровые (Digital Inclinometer), сигнал на выходе таких датчиков выдается в виде цифрового кода.

Принцип действия магнитных датчиков угла наклона (ДУН) основан на регистрации перемещения «свободно висящего или плавающего» постоянного магнита относительно приемной поверхности магниточувствительного элемента ПМП.

На рис. 5.75 приведены конструкция и принцип действия простейшего датчика угла наклона.

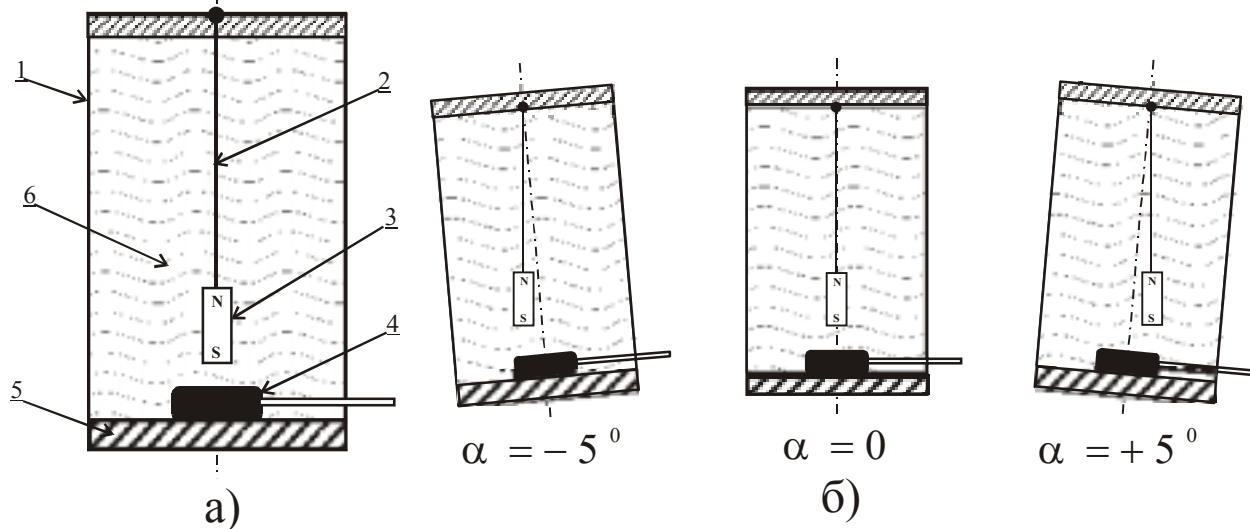


Рис. 5.75. Простейший датчик угла наклона: а - конструкция; б - принцип действия: 1-корпус датчика; 2-подвес; 3 - постоянный магнит; 4-магниточувствительный элемент; 5 -основание корпуса; 6 - демпфирующая жидкость

Конструкция датчика состоит из герметичного корпуса 1 на крышке которого при помощи свободного подвеса 2 укреплен постоянный магнит 3. Под действием сил притяжения Земли магнит занимает строго вертикальное положение. На основании корпуса 5 расположен магниточувствительный элемент преобразователя магнитного поля, в качестве которого могут использоваться магниторезисторы, элементы Холла, магниточувствительные ИС и т.д. Внутренняя полость корпуса заполнена демпфирующей жидкостью 6, в качестве которой часто используется силиконовое масло.

Принцип работы датчика понятен из рис. 5.75.а. При наклоне датчика относительно поверхности Земли происходит перемещение постоянного магнита на угол α относительно приемной поверхности МЧЭ, что приводит к изменению величины индукции магнитного поля, и, следовательно, к изменению (или появлению) сигнала.

На рис. 5.76 в качестве примера приведены электрическая схема и выходные характеристика и габаритные размеры простейшего датчика угла наклона типа РМР-STX. Датчик реализован с использованием дифференциального магниторезистора.

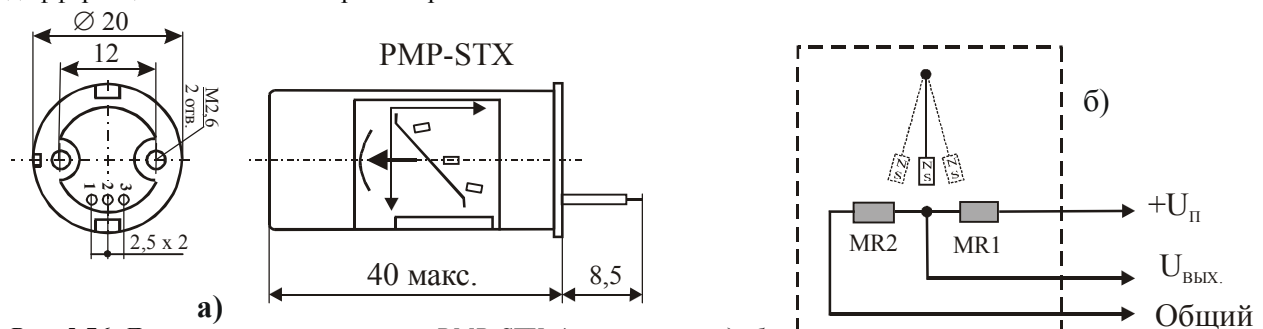


Рис. 5.76. Датчик угла наклона типа РМР-STX: а - внешний вид; б - электрическая схема

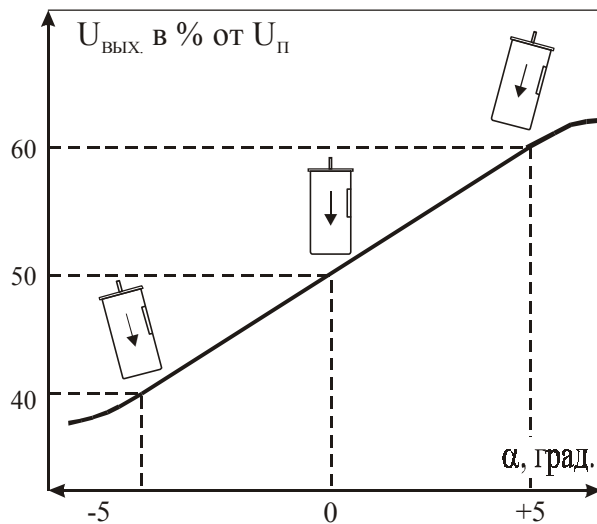


Рис. 5.76.в. Выходная характеристика (в) датчика угла наклона типа PMP-STX

В таблице 5.16 приведены основные параметры магнитного датчика угла наклона типа PMP-S5LX, выпускаемого фирмой Mirodi America Corp.

Таблица 5.16. Основные параметры магнитного датчика угла наклона типа PMP-S5LX

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Полный диапазон, град	± 5
2	Линейный диапазон, град.	± 6
3	Порог чувствительности, град	0,005
4	Коэффициент нелинейности преобразования, %	$\pm 1,0$
5	Несимметричность характеристики, %	$\pm 0,5$
6	Начальное выходное напряжение при $\alpha = 0^\circ$ в % от U_{Π}	50 ± 3
7	Чувствительность, в % от U_{Π} на град.	$1,3 \pm 0,3$
8	Постоянная времени, мс	300
9	Максимальное напряжение питания, U_{Π} , В	14
10	Диапазон рабочих температур, $^\circ\text{C}$	$0 \dots +60$
11	Габаритные размеры, мм	$\varnothing 20 \times 40$
12	Масса, г, не более	35

Малогабаритные датчики угла наклона обладают высокими эксплуатационными характеристиками. Их высокая точность, миниатюрные размеры, отсутствие подвижных механических узлов, простота крепления на объекте и низкая стоимость делают целесообразным использовать их не только в качестве датчиков крена, но и заменять ими угловые датчики, причем не только на стационарных, но и на подвижных объектах.

В качестве основных можно считать следующие области применения.

1. Автомобильная техника. Это работа их в системе автонавигации, определения профиля дороги, в системе горизонтирования салона, в системе автомобильного торможения ABS, системах охранной сигнализации. Они могут контролировать положение руля, положение заслонок и штоков, осуществляющих регулировку мощности двигателя и коробки передач, отопление и вентиляцию салона, следить за положением кресел и их спинок и т.п.
2. Определение крена автомобилей, кораблей и подводных роботов, дорожных грейдеров и асфальтоукладчиков, подъемников и кранов, экскаваторов, сельскохозяйственных машин.
3. Долговременное определение положения различных высотных сооружений, плотин, стволов шахт, использование в системах горизонтирования платформ, определение величины прогибов и деформаций различного рода опор и балок.
4. Контроль углов наклона автомобильных и железных дорог при их строительстве, ремонте и эксплуатации.
5. Определение направления бурения нефтяных и газовых скважин, использование в системах управления насосами нефтяных скважин.
6. Использование в роботах, станках и печатных прессах для контроля положения механизма, режущего органа или валика на печатных прессах. А также для контроля положения валов, колес, механизмов редукторов, как на стационарных, так и подвижных объектах.
7. Использование в системах охранной сигнализации, (в первую очередь автомобильных), и приборах сейсмоакустического контроля.

5.6. Магнитные датчики для считывания информации с магнитных носителей

В связи с заметными успехами в технологии изготовления современных высокочувствительных преобразователей магнитного поля все большее распространение получают магнитоэлектронные устройства, предназначенные для воспроизведения информации, записываемой на специальные носители. К таким носителям относятся: магнитные ленты и магнитные карты, штрих-коды, а также банкноты, помеченные магнитными индикаторами (магнитными красками, магнитными нитями и т.д.).

Принцип действия указанных устройств аналогичен традиционным индукционным воспроизводящим головкам, используемым для воспроизведения магнитной записи звука и др. информации. Воспроизводящая головка преобразует изменение магнитного потока движущегося носителя информации в электрический сигнал.[10]

Принцип действия индукционной воспроизводящей магнитной головки понятен из рис. 5.77, где приведено и её схематическое изображение.

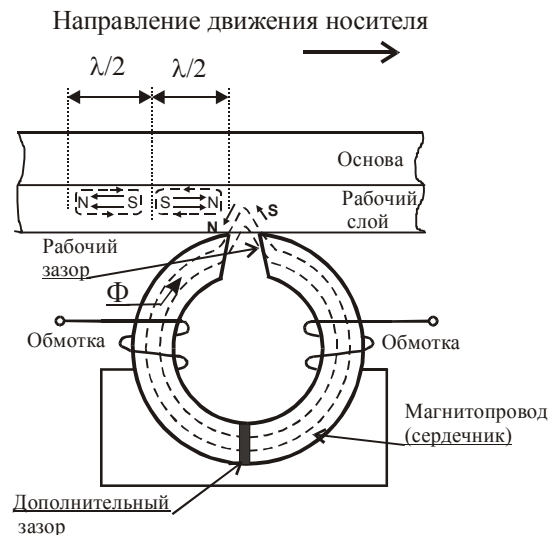


Рис. 5.77. Схематическое изображение индукционной воспроизводящей головки

Магнитопровод индукционной воспроизводящей магнитной головки (ВИМГ), как правило, образован двумя симметричными полукольцами с обмотками, между которыми расположены два зазора: рабочий и дополнительный. (Рис. 5.77)

В процессе воспроизведения внешний магнитный поток носителя информации (например, магнитной ленты или магнитной карты) замыкается через сердечник воспроизводящей головки, имеющей малое магнитное сопротивление по сравнению с воздухом, и, пронизывая обмотку головки индуцирует в ней э.д.с. Эта э.д.с. изменяется пропорционально скорости изменения магнитного потока в носителе информации около рабочего зазора. Таким образом, при воспроизведении головка преобразует энергию движения магнитной фонограммы в электрическую энергию.

Основные параметры ВИМГ определяются шириной рабочего зазора, т.е. промежутком между торцами магнитопровода, заполненного диамагнитным материалом. Для ВИМГ этот параметр является главным, поскольку он определяет вносимые рабочим зазором (S_p) частотные искажения, зависящие от длины волны. При уменьшении длины волны записи l и равной ширине, т.н. эффективного $D_{эф}$ рабочего зазора, э.д.с. снижается до нуля. В этом случае основная часть магнитного потока от носителя информации замыкается в рабочем зазоре, не попадая в сердечник головки. ($D_{эф}$ - эффективная ширина рабочего зазора которая на 10...15% превышает ширину рабочего зазора S_p). Другим основным параметром ВИМГ является отдача E - это э.д.с. индуцируемая в обмотке головки при воспроизведении записи с определенной намагниченностью и частотой воспроизводимого сигнала.

Для индукционных головок величина рабочего зазора (S_p) лежит в пределах от 5 до 20 мкм.

Отдача (E) составляет от 0,4 до 6 мВ при воспроизведении измерительной ленты ЛИР I-38У.[10]

Магнитоэлектронные воспроизводящие и считывающие головки

Конструкции магнитоэлектронных воспроизводящих и считывающих головок имеют много общего с индукционными, но вместо обмотки в таких головках используются преобразователи магнитного поля.

В качестве «измерителя» напряженности магнитного поля в рабочем зазоре магнитоэлектронных головок используют ПМП многих известных типов, например, магниторезисторы, элементы Холла, магнитодиоды и т.п.

Магнитоэлектронные воспроизводящие головки

Принцип действия магнитных головок, реализованных с применением элементов Холла иллюстрируется на рис. 5.78.

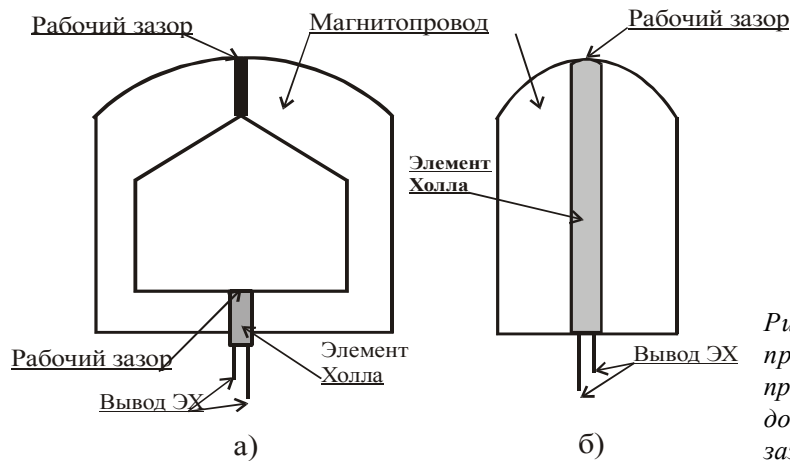


Рис. 5.78. Конструкция звуковоспроизводящих головок, реализованных с применением элементов Холла: а - с ЭХ в дополнительном зазоре; б - с ЭХ в рабочем зазоре

Элемент Холла в звуковоспроизводящей головке может размещаться в дополнительном (рис. 5.78.а) или в рабочем зазоре (рис. 5.78.б). Конструктивно наиболее просто реализуется головка с ЭХ в дополнительном зазоре. В этом случае через ЭХ проходит только часть магнитного потока от носителя записи из-за рассеяния и ответвления через рабочий зазор. Поэтому по чувствительности такая головка уступает головке с ЭХ, помещенной в рабочий зазор. В то же время головка с ЭХ в дополнительном зазоре может быть выполнена с более высокой разрешающей способностью, так как её рабочий зазор определяется только толщиной немагнитной прокладки. Во второй конструкции рабочий зазор определяется толщиной ЭХ, который изготовить по традиционной технологии тонким довольно трудно. Однако современная технология уже позволяет создавать ЭХ с толщиной порядка 30...50 мкм.

Наилучшим материалом сердечника для головок с элементом Холла является феррит. При ферритовом сердечнике отпадает необходимость электрической изоляции контактов МЧЭ от сердечника (магнитопровода), поскольку феррит имеет весьма высокое удельное электрическое сопротивление. В головках с металлическим магнитопроводом ЭХ и его контакты изолируются от сердечника тонкой прокладкой.

К сожалению, ферритовые сердечники обладают неудовлетворительными механическими свойствами, затрудняющими изготовление головок с хорошим качеством рабочего зазора.

Частотная характеристика головок с ЭХ в области высоких частот зависит от тех же факторов, которые определяют характеристику индукционной воспроизводящей головки. Характеристика ЭДС самого ЭХ практически равномерна до частот порядка нескольких МГц.

Наибольший интерес представляет использование таких головок для воспроизведения низких частот, практически от 0 Гц.

Отдача головок с ЭХ на основе InSb составляет примерно 0,8 мВ, но их параметры существенно зависят от температуры. (ΔE составляет примерно 2% на 1 °C).

Головки с ЭХ на основе InAs имеют отдачу в 3...3,5 раза меньше, но она в меньшей степени зависит от температуры (ΔE составляет порядка 0,1 % на °C).

На рис. 5.79. приведена схема еще одного варианта воспроизводящей головки, представляющей единое целое с записывающей головкой. В магнитной воспроизводящей головке использован элемент Холла, изготовленный на основе антимонида индия (InSb).

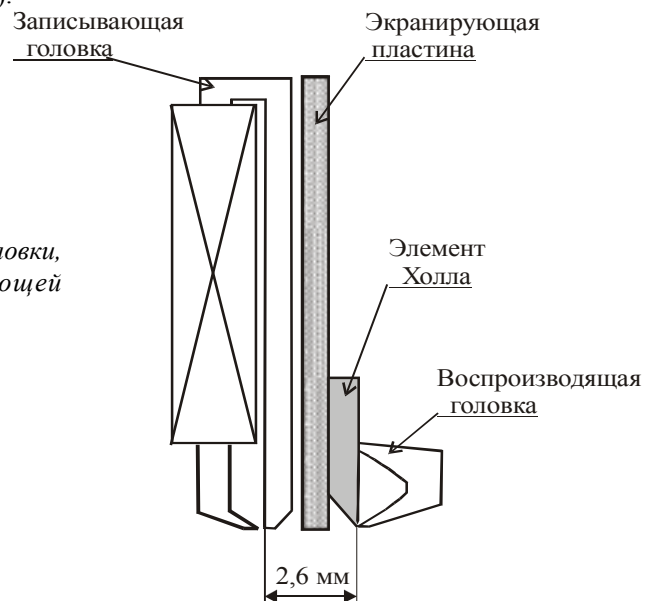


Рис. 5.79. Схема варианта воспроизводящей головки, представляющей единое целое с записывающей головкой

По сравнению с традиционными индукционными головками, головки с применением МЧЭ, имеют широкую полосу воспроизводимых частот, начиная с постоянного тока до 50 кГц и более. В результате – отпадает необходимость использования специальных схем, корректирующих (выравнивающих) их частотную характеристику.

Такие головки являются одним из перспективных направлений, отвечающих важному требованию, предъявляемому к современным приборам, требованию микроминиатюризации (ширина одной дорожки равна 0,3–1,0 мкм). [19].

В работе [9] приводится вариант конструкции воспроизводящей головки на магнитодиоде. На рис. 5.80. показано схематическое устройство такой головки.

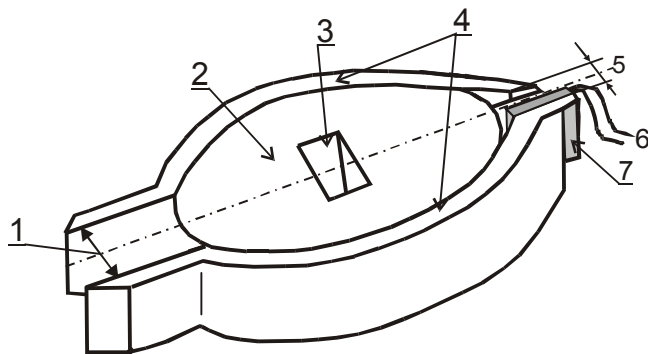


Рис. 5.80. Схематическое устройство воспроизводящей головки с использованием магнитодиода.

Два С-образных полусердечника 4 образуют рабочий 1 и дополнительный 5 зазоры (см. рис. 5.80). Внутри полусердечника установлен постоянный магнит 2 в виде цилиндра. Постоянный магнит, намагниченный перпендикулярно плоскости, проходящей через ось цилиндра и середину рабочего зазора, своей цилиндрической поверхностью сопрягается с внутренними поверхностями полусердечников. Между параллельными плоскостями дополнительного зазора размещен магнитодиод 7, выводы 6 которого включаются в электронную схему воспроизведения. Постоянный магнит 2 снабжен замком в виде окна 3.

Описанная головка работает следующим образом. Движущийся магнитный накопитель информации вызывает изменение потока магнитной индукции в рабочем зазоре. Это приводит к соответствующему изменению потока магнитной индукции через установленный в дополнительном зазоре магнитодиод. Происходит изменение сопротивления магнитодиода, пропорциональное изменению магнитного потока.

Воспроизводящая головка на магнитодиоде намного чувствительнее головок на магниторезисторах.

Описанная выше воспроизводящая головка нашла применение в устройстве останова диктофона, т.к. существующие устройства останова, применяемые в аппаратах с дисковыми накопителями информации и содержащие концевые датчики – имеют сложную конструкцию и обладают низкой надежностью.[4]

В последние годы все более широкое распространение получают, т.н. **тонкопленочные** воспроизводящие и записывающие головки.

Обмотки, магнитопроводы, смещающие магниты, магниточувствительные и др. элементы таких головок формируются методами тонкопленочной технологии, используемой для изготовления интегральных схем. Большинство таких головок универсальны и служат для записи и воспроизведения информации с магнитных носителей с высокой плотностью упаковки.

Такая головка представляет собой сложное интегральное магнитоэлектронное устройство. Записывающая обмотка такой головки представляет собой печатную структуру из медной пленки. А в качестве воспроизводящей «обмотки» используется тонкопленочный магниторезистор. На рис. 5.81 в качестве примера приводится один из вариантов конструкции тонкопленочной головки.

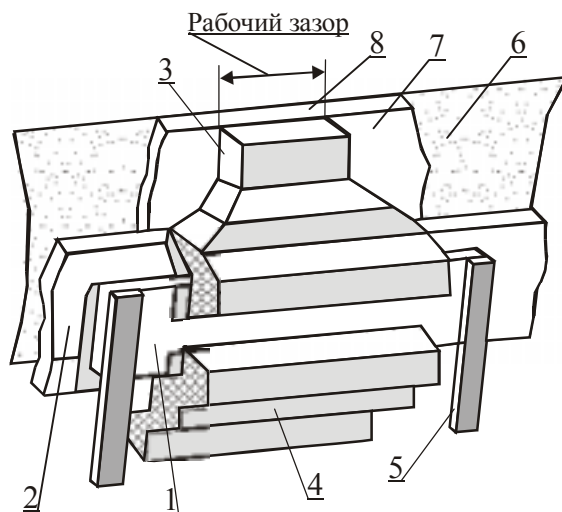


Рис. 5.81. Вариант конструкции тонкопленочной магнитной головки: 1 - магниторезистивный элемент; 2 – смещающая полоса; 3 – полюсный наконечник токоведущего провода; 4 – замыкающая часть магнитопровода; 5 – электропроводящая полоса; 6 – ферритовая подложка; 7 – диэлектрический слой рабочего зазора; 8 – рабочий зазор

Тонкопленочные магнитные головки обладают высокими магнитоэлектрическими параметрами и эксплуатационными характеристиками. Они изготавливаются по групповым технологиям, и, следовательно, дешевле, т.н. массивных. В таблице 5.16 приводятся основные параметры записи-воспроизведения массивных и тонкопленочных головок. Подробнее см. [13]

Таблица 5.17. Основные параметры записи-воспроизведения массивных и тонкопленочных головок

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип головки	
		Массивная головка	Тонкопленочная головка
1	Число витков обмотки	10...1000	0,2...2,5
2	Рабочий зазор, мкм	0,5...6,3	1024
3	Длина поверхности полюсного	0,1...10	(1...10)*10 ⁻³
4	Ширина дорожки, мм	0,02...1,3	(5...100)*10 ⁻³
5	Резонансная частота, МГц	0,1...1,0	10...200
6	Амплитуда тока записи, мА	10...100	50...300
7	Выходной напряжение, мВ	0,1...100	0,1...30
8	Магнитная проницаемость	менее 1000 (при 2 МГц)	более 1000 (при 20 МГц)
9	Магнитная индукция насыщения, Тл	0,2...0,6	1...1,8

Магнитные датчики распознавания образов

Большую группу специализированных воспроизводящих магнитных головок составляют, т.н. магнитные датчики распознавания образов. Одни из них нашли применение в определителях подлинности банкнот.

При печатании казначейских билетов для создания определенных рисунков используются магнитные чернила и магнитные краски. Для каждого казначейского билета создается свой рисунок. На рис. 5.82 приводится вариант конструкции магнитоэлектронной головки для считывания и распознавания рисунков, нанесенных магнитной краской. Электрическая схема этой головки показана на рис. 5.83.

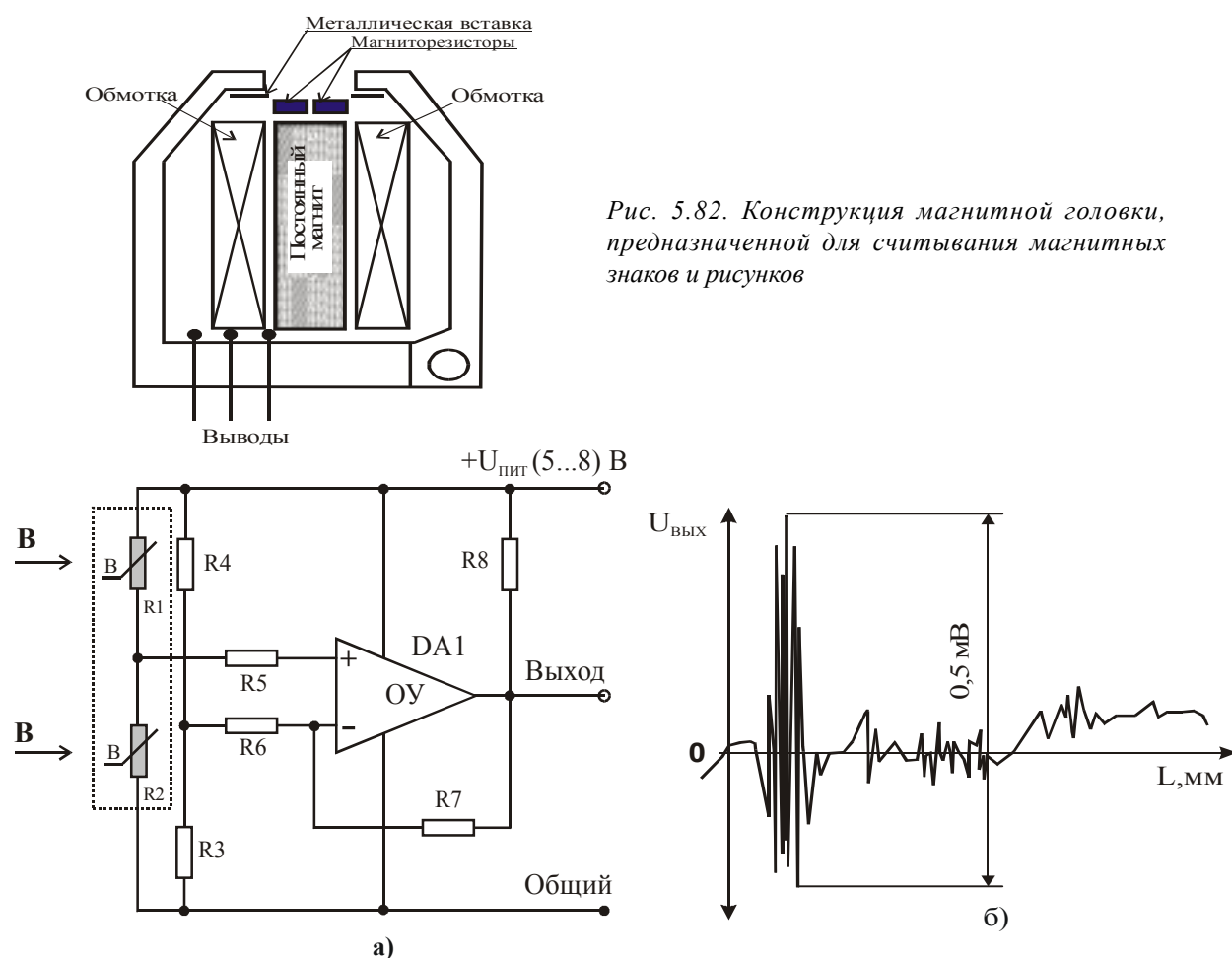


Рис. 5.83. Магнитная головка: а - упрощенная электрическая схема; б - форма сигнала на выходе

При считывании информации с банкноты достоинством в 1000 иен на выходе датчика генерируется сигнал примерно 0,5 мВ (рис. 5.83.а), что гарантирует высокую достоверность распознавания [19].

На рис. 5.84 приведены не требующие особых пояснений схемы конструкций считывающих головок на основе «монолитных» магниторезисторов [49, 50]. На рис. 5.85 дана упрощенная схема записи и воспроизведения магнитных штрих-кодов с применением указанных головок.

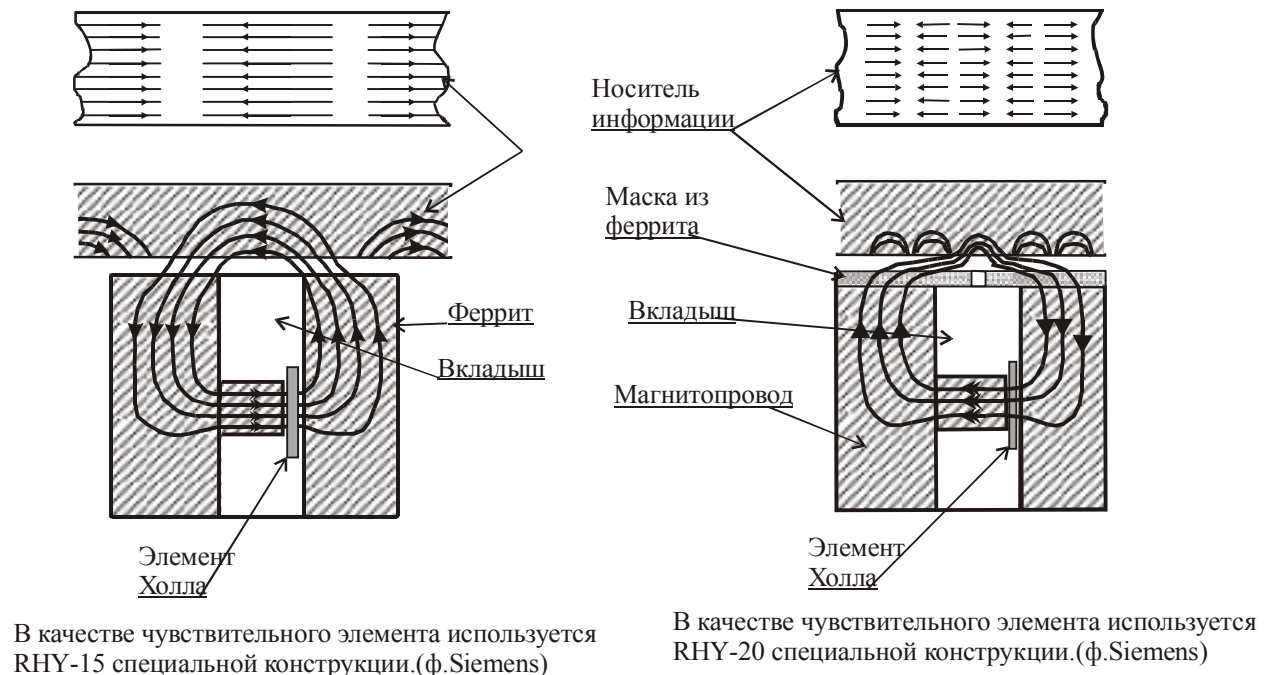


Рис. 5.84. Схемы конструкций двух считывающих головок на основе «монолитных» магниторезисторов фирмы Siemens

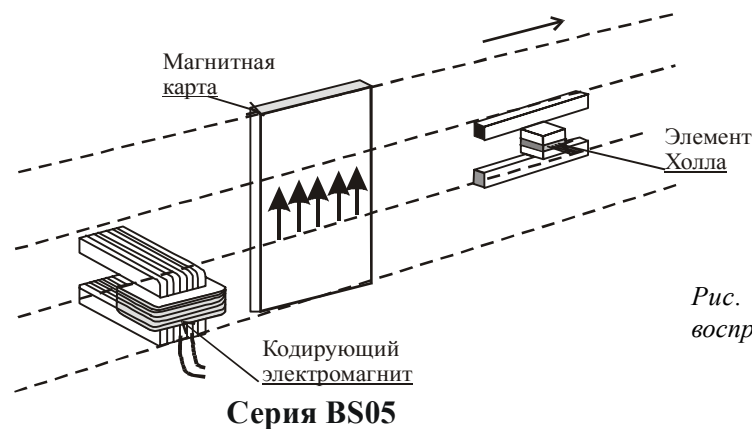


Рис. 5.85. Структурная схема записи и воспроизведения магнитных штрих-кодов

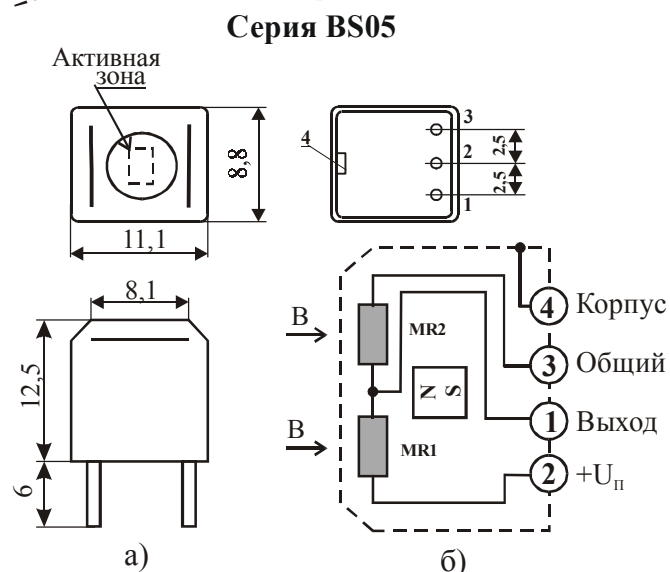


Рис. 5.86. Считывающие головки, выпускаемые фирмой Murata: а – внешний вид; б – электрическая схема

Наиболее известными производителями магнитоэлектронных считывающих головок являются фирмы Murata, Siemens, Asahi, Densi, Katsura Sanho Co.Ltd., Modis Corporation, Sony и др. На рис. 5.86 показан внешний вид и дана электрическая схема считывающих головок серии BS05, выпускаемых фирмой Murata. В табл. 5.18 приведены их основные параметры.

Таблица 5.18. Основные параметры считывающих головок серии BS05, выпускаемых фирмой Murata

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип головки / значение параметра		
		BS05N1HBAA	BS05M1HFAI	BS05I1KFAB
1	Напряжение питания, В	5	5	5
2	Входное сопротивление, кОм	0,5...6,0	0,5...6,0	1,0...15,0
3	Минимальное (эффективное) выходное напряжение, мВ	235	150	0,3...0,8
4	Ширина рабочей зоны, мм	6	3	10
5	Разрешающая способность, мм	0,75	0,75	0,75
6	Диапазон рабочих температур, °C	-45...+125	-45...+100	-40...+150
7	Габаритные размеры, мм	11,1 x 12,8 x	15 x 7,5 x 45	10,8 x 10,1 x 15
8	Масса, г, не более	10	10	10

Параметры, внешний вид и габариты некоторых типов магнитных датчиков, предназначенных для считывания информации с плоских носителей, приводятся в главе 17 тома 2.

В последнее время широкое распространение получили системы записи, хранения и считывания информации, основанные на использовании эффекта Виганда.

В общем виде носитель информации, использующий указанный эффект, представляет собой карточку стандартного размера, изготовленную из специальной пластмассы. В карточку впрессованы один или два ряда проволок Виганда точно установленного размера. Эти проволоки, в зависимости от их «магнитного состояния», представляют 0 или 1. На такую карточку может быть занесена информация с максимальным объемом 56 бит.

Считывающая головка в данном случае представляет собой устройство, содержащее обмотку и пару постоянных магнитов. Пример такого устройства приведен на рис. 5.87.

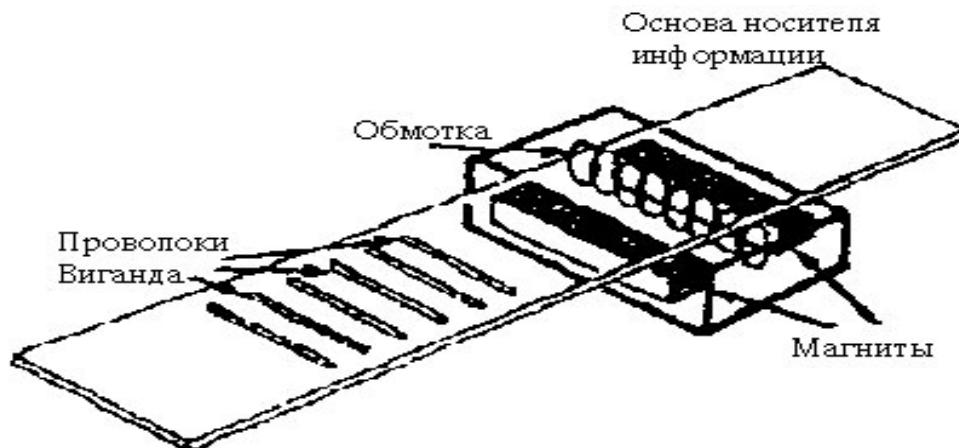


Рис. 5.87 Считывающее устройство, использующее эффект Виганда

Перед тем как носитель (карта) поступит на устройство считывания, все проволоки должны быть насыщены в одном и том же направлении магнитного насыщения. Следовательно, информация станет полностью независимой от воздействия внешних полей, которые могут изменять магнитное состояние проволок перед считыванием. Информация основана только на геометрической конфигурации проволок и поэтому не изменяется.

Несколько слов о карточках

В современных электронных системах расчетов и контроля доступа используются устройства идентификации следующих основных типов:

- считыватели карточек с магнитной полосой;
- считыватели карточек Виганда;
- считыватели бесконтактных карточек с микросхемой.

Ниже остановимся на особенностях использования считывающих устройств двух первых типов.

Считыватели карточек с магнитной полосой

Карточка с магнитной полосой представляет собой стандартную пластиковую карточку, на которую с помощью специального кодирующего устройства записан персональный цифровой код и др. необходимая информация. Согласно международному стандарту ISO, на магнитной полосе может находиться от одной до трех дорожек записи, причем их положение, ширина и ряд других параметров строго регламентируются стандартом. Основным элементом считывателя карточек — магнитная головка. Передвигая карточку в специальной щели считывателя, мы перемещаем магнитную полосу мимо головки, и считываем записанную на карточке информацию.

Стоимость карточек и считывателей достаточно низка (карточка стоит 1—4 долл. США, а считыватель в зависимости от типа — 100—300 долл.). Однако карточки требуют весьма бережного обращения, поскольку подвержены воздействию электромагнитных полей, а считыватели достаточно капризны в эксплуатации, поскольку их магнитные головки со временем засоряются и смещаются, что приводит к снижению пропускной способности систем контроля доступа (чтобы записанная информация считалась, зачастую приходится проводить карточкой через считыватель несколько раз).

Для повышения защищенности системы от несанкционированного доступа код, записанный на карточке, можно легко менять с помощью специального устройства чтения/записи, однако в целом защищенность невелика, поскольку лицо, завладевшее чужой карточкой на весьма короткое время, может сделать неограниченное число дубликатов.

Простые карточки с магнитной полосой для серьезных систем доступа, очевидно, уходят в прошлое. Некоторое время назад они использовались в случае желания потребителя иметь единые карточки, как для финансовых расчетов, так и для систем доступа, но теперь и в этом случае использовать их необязательно, поскольку карточки различных технологий выпускаются уже и с нанесенной на них магнитной полосой.

Считыватели карточек Виганда

Устройство карточек и считывателей достаточно просто. В структуру пластиковой карточки при производстве впечатываются две полосы проволок Виганда, расположенных в строго определенной последовательности (различной для каждой карточки) и содержащих информацию о персональном коде ее владельца. Считыватель, который фактически является индукционной катушкой с двумя магнитами противоположной полярности, расположен в пластиковом или металлическом корпусе и для полной герметичности залит специальным изоляционным материалом. Считывание ведется бесконтактным индукционным методом, и при перемещении карточки вблизи считывателя одна полоска формирует положительные скачки индукционного тока (тракуются системой как единицы), а вторая – отрицательные (тракуются как нули), соответствующие бинарному коду карточки.

Достоинствами данной технологии признаны:

- высокая надежность вследствие простоты устройства систем считывания;
- сложность подделки карточки в связи с отсутствием информации о составе проводников;
- высокая устойчивость карточки к внешним воздействиям;
- невысокая стоимость считывателей и карточек (цена карточки – 3–7 долларов, а считывателя, в зависимости от типа, – от 250 до 460 долларов).

Сравнительные характеристики наиболее распространенных систем считывания карточек приведены в табл. 5.19.

Таблица 5.19. Сравнительные характеристики наиболее распространенных систем считывания карточек

№ п/п	Наименование показателя качества	Типа карточки		
		Карточка с магнитной полосой	Карточка с элементами Виганда	Карточка бесконтактного считывания
1	Затраты на эксплуатацию	высокие	отсутствуют	низкие
2	Скрытность кода	низкая	высокая	средняя
3	Время жизни карты	малое	большое	большое
4	Время жизни считывателя	малое	большое	среднее
5	Влияние электромагнитных полей	высокое	отсутствует	высокое
6	Стоимость инсталляции системы	низкая	средняя	высокая
7	Стоимость при эксплуатации	высокая	низкая	средняя
8	Возможность изменения кода	есть	отсутствует	отсутствует
9	Пропускная способность	низкая	средняя	высокая

5.7. Датчики измерения тока и напряжения

Большой класс изделий микромагнитоэлектроники представляют датчики для бесконтактного измерения тока и напряжения (ДТиН).

До недавнего времени для решения указанных задач в основном использовались классические датчики в виде шунтов, трансформаторов тока и магнитных усилителей. Каждый из этой группы датчиков обладает своими достоинствами и рядом недостатков.

Так, например, шунт отличается простотой исполнения, однако не обеспечивает гальванической развязки от токовой шины.

Трансформатор тока имеет, как правило, предельно низкую цену, однако не способен измерять постоянный ток.

Магнитный усилитель ограничивается измерением только пульсирующих токов.

Все перечисленные недостатки устраняются в конструкциях следующего поколения датчиков, получивших название, бесконтактных датчиков измерения тока и датчиков напряжения.

Датчики тока и напряжения последнего поколения представляют собой магнитоэлектронные устройства, принцип действия которых основан на измерении магнитной индукции, создаваемой проходящим током и регистрируемый преобразователем магнитного поля. В качестве преобразователей магнитного поля, в принципе, могут использоваться любые типы преобразователей магнитного поля: элементы Холла, магниторезисторы, магнитодиоды, магнитотранзисторы и др.

Однако наибольшее распространение для указанных целей получили два типа ПМП: магниторезисторы - для регистрации малых токов (до 0,5 А) и элементы Холла - для измерения больших токов (до 1000 А и более).

В промышленных образцах измерителей тока и напряжения, как правило, используются магниточувствительные и магнитоуправляемые микросхемы с использованием интегральных элементов Холла. При этом элемент Холла качественно обрабатывает постоянные и низкочастотные (до 20 кГц) сигналы, а в области высокочастотных сигналов датчик тока работает уже как трансформатор тока, что обеспечивает полосу пропускания частот измеряемых токов до 200 кГц и более.

Использование современных высокочувствительных ПМП позволяет реализовать их главное преимущество: датчики на их основе способны измерять без разрыва цепи как постоянный, так и переменный ток, гарантируя гальваническую развязку источника сигнала и измерительного прибора.

5.7.1. Общие принципы бесконтактного измерения тока

Измерение тока бесконтактным способом, в общем случае, сводится к измерению индукции магнитного поля, создаваемого измеряемым током с последующим выполнением необходимых вычислений.

В тех случаях, когда сила тока, протекающего через проводник, достаточно велика (более 100 А), можно измерить силу этого тока путем определения индукции магнитного поля рассеяния, расположив преобразователь магнитного поля на безопасном расстоянии вблизи токнесущего проводника или кабеля (Рис. 5.88.)

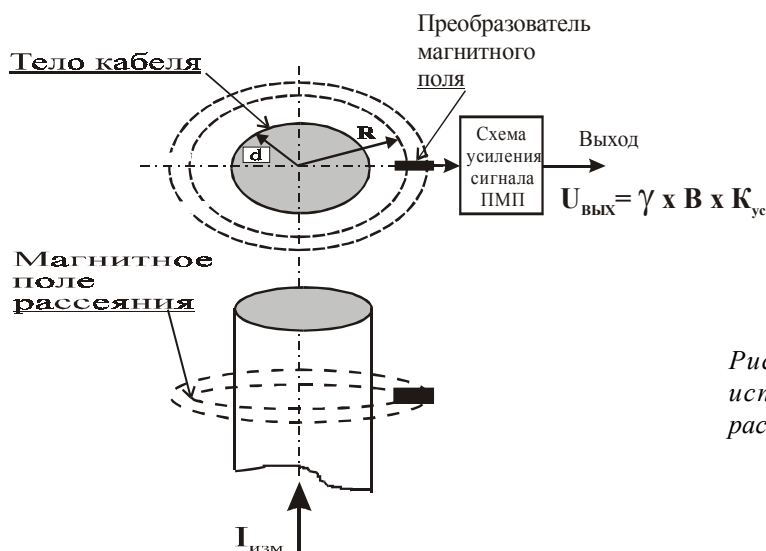


Рис. 5.88. Схема измерения тока с использованием магнитного поля рассеяния

Для проводника круглого сечения радиусом $R_{\text{к}}$, по которому проходит ток I_1 , тангенциальная составляющая магнитной индукции на расстоянии $R_{\text{б}} > d$ от центра проводника определяется выражением:

$$B = \frac{\mu_0 \times I_1}{2\pi \times R_{\text{б}}} \quad (5.17)$$

где μ_0 – магнитная постоянная, равная $1,257 \times 10^{-6} \text{ В} \times \text{с} / (\text{А} \times \text{м})$;

$R_{\text{б}}$ – безопасное расстояние от центра проводника до центра магниточувствительного элемента.

Приняв безопасным расстояние $R_b = 10$ мм, результаты расчета сведем в таблицу 5.20.

Таблица 5.20. Результаты расчета индукции рассеянного магнитного поля

Ток I_1 , А	1	5	10	50	100	500	1000
Индукция, В, м	0,02	0,1	0,2	1	2	10	20

Если сила тока в проводнике мала для получения необходимого сигнала на выходе ПМП, последний помещается в воздушный зазор δ концентратора магнитного поля, охватывающего проводник с током. (Рис. 5.89.а, б). Обычно концентратор выполняется из ферромагнитных материалов с узкой петлей гистерезиса (электротехнические стали, пермаллой, феррит и пр.).

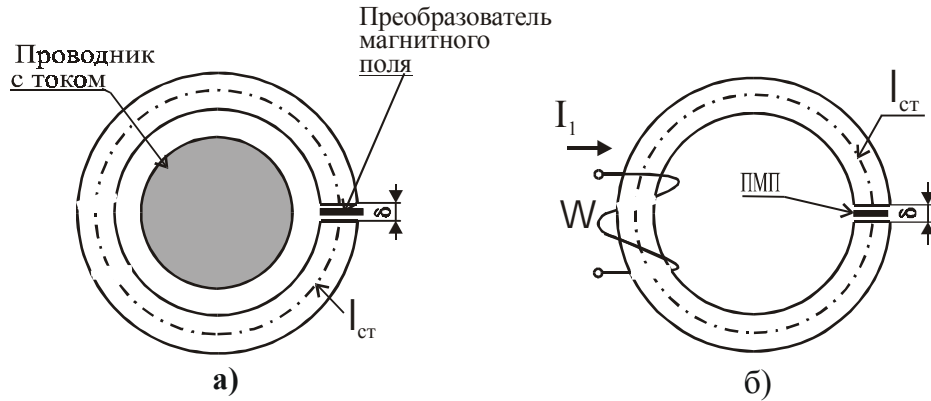


Рис. 5.89. Измерение тока при использовании: а – концентратора магнитного поля; б – концентратора и токовой обмотки

Магнитная индукция в воздушном зазоре при пренебрежении потоками рассеяния определяется из выражения:

$$B = \frac{\mu_0 \times I_1}{\left[\delta + \frac{l_{cm}}{\mu_r} \right]} \quad (5.18)$$

где μ_r – магнитная проницаемость материала концентратора магнитного поля;

δ – длина воздушного зазора;

l_{cm} – средняя длина магнитной силовой линии концентратора.

Если $l_{cm} < 100\delta$, можно пренебречь составляющей $\frac{l_{cm}}{\mu_r}$, тогда индукция в воздушном зазоре будет определяться выражением:

$$B = \frac{\mu_0 \times I_1}{\delta} \quad (5.19)$$

При измерении относительно малых токов (до 10 А) можно использовать конструкцию, приведенную на рис. 5.89.б. В этом случае измеряемый ток пропускают через токовую обмотку ω . Индукция в воздушном зазоре δ определяется по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 \times I_1 \times n}{\delta} \quad (5.20)$$

где n – число витков в токовой обмотке ω .

При этом площадь сечения проводника S_{np} в токовой обмотке ω при максимальном измеряемом токе рассчитывается по формуле:

$$S_{np} = \frac{I_{1max}}{j} \quad (5.21)$$

где j – плотность тока, равная 5 А/мм²;

I_{1max} – максимальное значение измеряемого тока, А.

Диаметр провода d в обмотке определяется из выражения:

$$d = \frac{4S_{np}}{\pi} \quad (5.22)$$

Используя формулы (5.18...5.22) при воздушном зазоре $\delta = 1$ мм полученные значения B сведём в таблицу 5.21.

Таблица 5.21. Результаты расчета индукции в зазоре $\delta = 1$ мм

Количество витков в токовой катушке	Ток в обмотке, А / индукция в зазоре, мТл						
	1	5	10	50	100	500	1000
1 виток	1,26	6,29	12,6	62,9	126	629	1257
3 витка	3,8	18,9	37,7	189	377	1886	3771
5 витков	6,3	31,4	62,9	314	629	3143	6285
Диаметр провода в обмотке, мм	0,5	1,1	1,6	3,6	5	11,3	16

В связи с тем, что потоки рассеяния и магнитная проницаемость μ_r материала концентратора являются функциями магнитной индукции, связь между измеряемым током I_1 и индукцией B в воздушном зазоре в той или иной мере отклоняется от линейной, чем и регламентируется погрешность бесконтактного измерения тока или напряжения.

Индукция B в воздушном зазоре тороидального сердечника также зависит и от свойств применяемых ферромагнитных материалов. На рис. 5.90 в качестве примера приведены характеристики двух магнитопроводов, изготовленных из ленточного пермаллоя и феррита.[17]

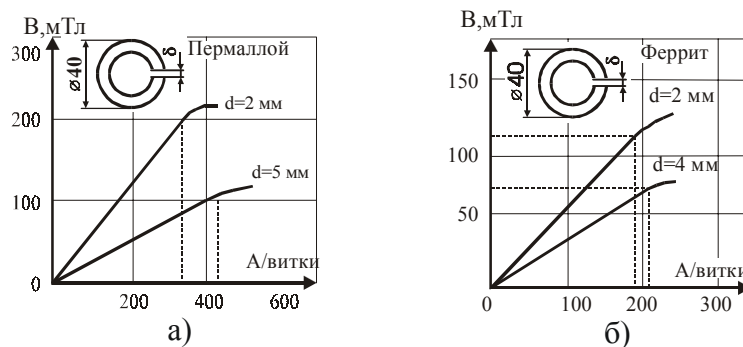


Рис. 5.90. Графики индукции в зазоре для колец: а - из пермаллоя; б - из феррита

По виду выходного сигнала датчика тока можно условно разделить на две группы:

- **линейные датчики** - (Linear Current Sensors);
- **цифровые датчики** - (Digital Current Sensors).

Сигнал на выходе линейного датчика пропорционален измеряемому току. Алгоритм работы линейного датчика понятен из рис. 5.91. а. У современных моделей датчиков, имеющих встроенные схемы АЦП, выходной сигнал может представляться и в цифровой форме.

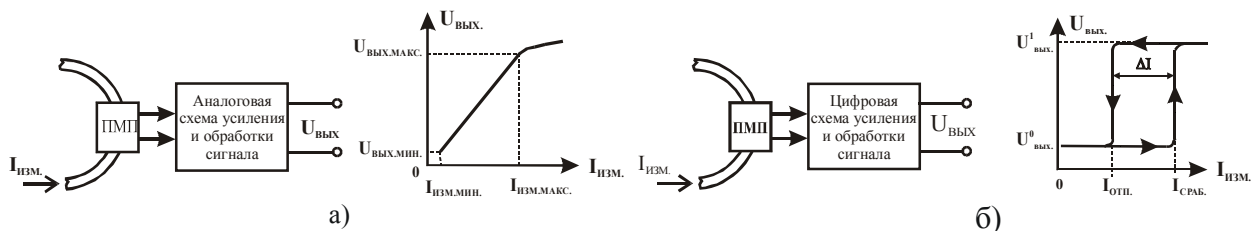


Рис. 5.91. Упрощенная структурная схема и выходная характеристика: а – линейного; б – цифрового датчика тока

На выходе *цифрового датчика* формируется стандартный сигнал в виде логической 0 или логической 1 (см. рис. 5.91.б). Причем у большинства датчиков сигнал в виде логической 1 выдается при достижении измеряемым током предельного (заданного) значения. У некоторых моделей датчиков сигнал может представляться в инверсной форме.

Выходной сигнал, выдаваемый в виде 0 или 1, может использоваться как для индикации, так и для управления последующими элементами систем автоматического управления.

Цифровые датчики часто называют *датчиками предельного тока*.

5.7.2. Схемотехника магнитных датчиков тока и напряжения

Схемотехника бесконтактных магнитных датчиков тока и напряжения определяется назначением и условиями эксплуатации прибора, а также технологическими возможностями производителя, стоимостью изготовления и др. факторами.

Исследование особенностей схемотехники бесконтактных датчиков тока и напряжения представляет собой специальную задачу, а потому подробно не рассматривается в настоящей работе.

Наибольшее распространение получили две разновидности структурных схем датчиков: схема прямого преобразования и компенсационная схема.

Схемы прямого преобразования

Упрощенный вариант схемы датчика тока с прямым преобразованием представлен на рис. 5.92. Эта схема достаточно проста и не требует особых пояснений. Измеряемый ток, проходя через токовую обмотку, возбуждает в зазоре магнитопровода поле определённой величины. Под воздействием индукции магнитного поля в ПМП возникает сигнал, который усиливается и поступает на выход датчика.

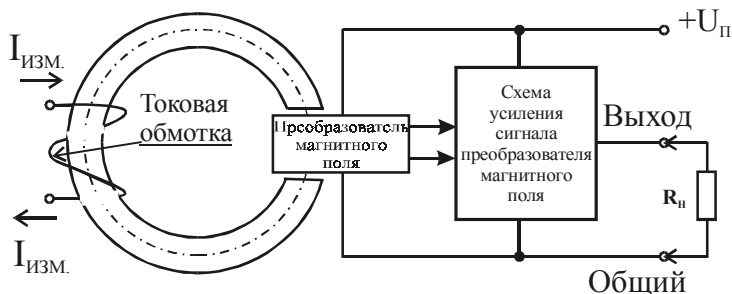
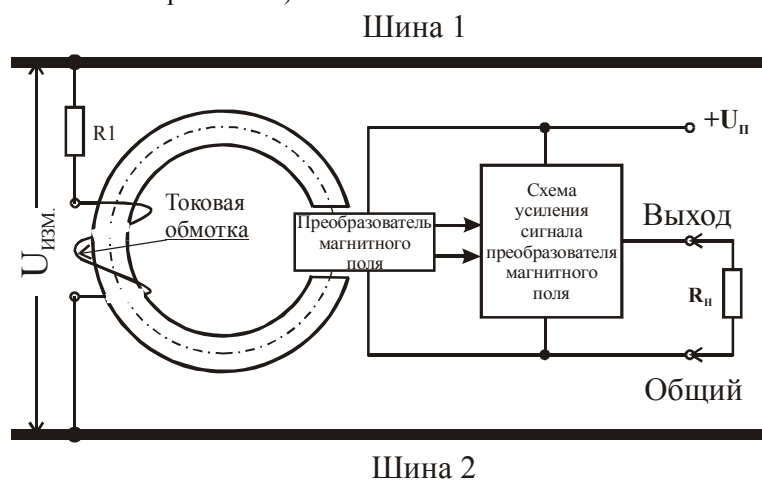


Рис. 5.92. Упрощенный вариант схема датчика тока с прямым преобразованием

На рис. 5.93 приведена упрощенная схема датчика напряжения. Эта схема отличается от схемы датчика тока тем, что при измерении напряжения токовая обмотка подключается к шинам 1 и 2 через резистор R1. (В зарубежной литературе резистор R1 часто называют «первичным»).

Рис. 5.93. Упрощенный вариант схемы датчика напряжения с прямым преобразованием



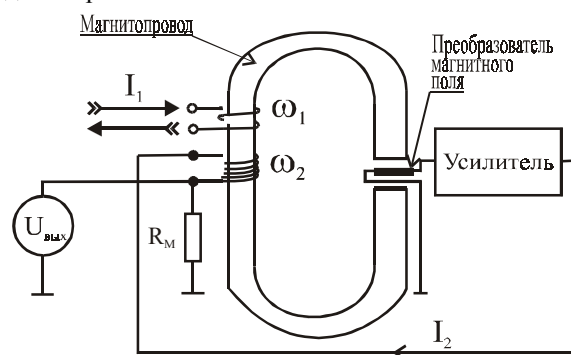
В датчиках, реализованных по схеме прямого преобразования, как правило, используется выход «по напряжению».

Компенсационная схема измерения тока

Компенсационную схему используют при необходимости повышения точности измерения и улучшения линейности характеристики преобразования. Такая схема часто называется схемой с «противовключением».

Упрощенный вариант компенсационной схемы приведен на рис. 5.94.

Рис. 5.94. Компенсационная схема измерения тока: ω_1 – токовая обмотка; ω_2 – компенсационная обмотка



В этой схеме (рис. 5.94) преобразователь магнитного поля используется как индикатор нулевого магнитного поля в воздушном зазоре δ .

Принцип действия схемы (рис. 5.94) достаточно прост.

Токовая обмотка ω_1 по которой протекает измеряемый ток I_1 создает в рабочем зазоре δ магнитное поле, регистрируемое чувствительным элементом преобразователя магнитного поля.

Напряжение сигнала ПМП поступает на вход усилителя, к выходу которого подключена компенсационная обмотка ω_2 и протекает ток I_2 . Эта обмотка создаёт в рабочем зазоре поток, направленный навстречу потоку, создаваемому током I_1 .

В этом случае схема противовключения стремится сохранить в зазоре **нулевой** магнитный поток.

Если учесть, что

$$I_1 \times n_1 = I_2 \times n_2, \quad (5.23)$$

то напряжение $U_{\text{вых}}$, измеряемое при $R_{\text{н.вых}} \Rightarrow \infty$, будет равно:

$$U_{\text{вых}} = R_{\text{м}} \times I_2 = R_{\text{м}} \times \left(\frac{n_1}{n_2}\right) \times I_1 \quad (5.24)$$

где n_1 - число витков в обмотке ω_1 ;

n_2 - число витков в обмотке ω_2 .

В датчиках, реализованных по компенсационной схеме, как правило, используется выход «по току».

Следует отметить, что использование компенсационной схемы неприемлемо для случая быстроизменяющихся токов, когда скорость реакции схемы противовключения несоизмерима со скоростью изменения измеряемого тока.

В этом случае следует использовать рационально построенные концентраторы магнитного поля с элементами Холла в магнитном зазоре.

5.7.3. Примеры технической реализации датчиков тока

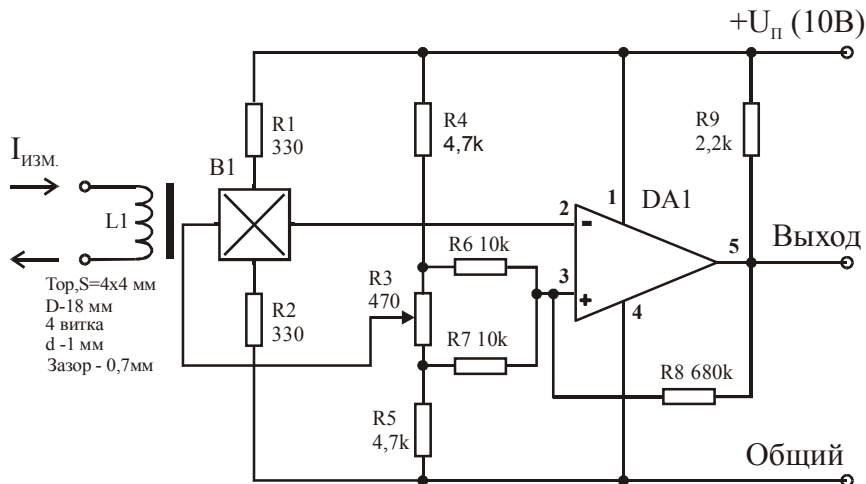
Конструктивное оформление магнитоэлектронных датчиков тока (или напряжения) определяется их назначением и конкретными условиями применения, а также техническими требованиями, предъявляемыми к этим приборам.

Датчики тока с применением элементов Холла

Простейший датчик тока состоит из магнитопровода торроидальной формы в рабочем зазоре которого установлен элемент Холла или магниточувствительная схема на основе ЭХ.

Как правило, изготавливают из пермаллоя или феррита ($\mu > 2000$). В случае необходимости для усиления сигнала ЭХ используются сравнительно простые электронные схемы с применением операционных (ОУ) или инструментальных (ИУ) усилителей, выполненных в виде полупроводниковых интегральных схем.

На рис. 5.95...5.97 в качестве примера приводятся несколько вариантов схем ДТ, реализованных с применением элементов Холла, магнитодиодов и магниторезисторов.



B1 - элемент Холла типа KSY 10 (фирмы "Siemens")

DA1 - операционный усилитель типа TAE1453A (фирмы "Siemens").

Рис. 5.95. Принципиальная электрическая схема датчика тока, реализованного с применением дискретного элемента Холла

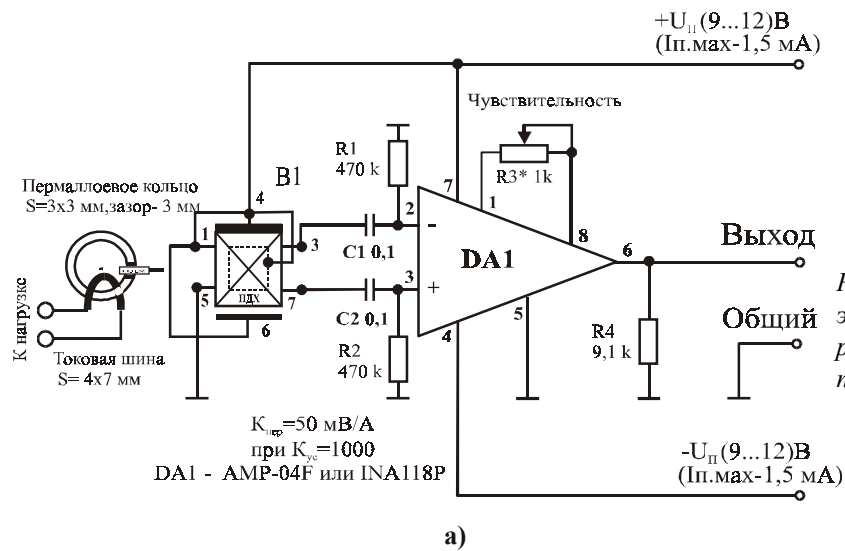


Рис. 5.96.а. Принципиальная электрическая схема датчика тока, реализованного с применением полевого элемента Холла

Рис. 5.96.б. Выходная характеристика датчика тока, реализованного с применением полевого элемента Холла

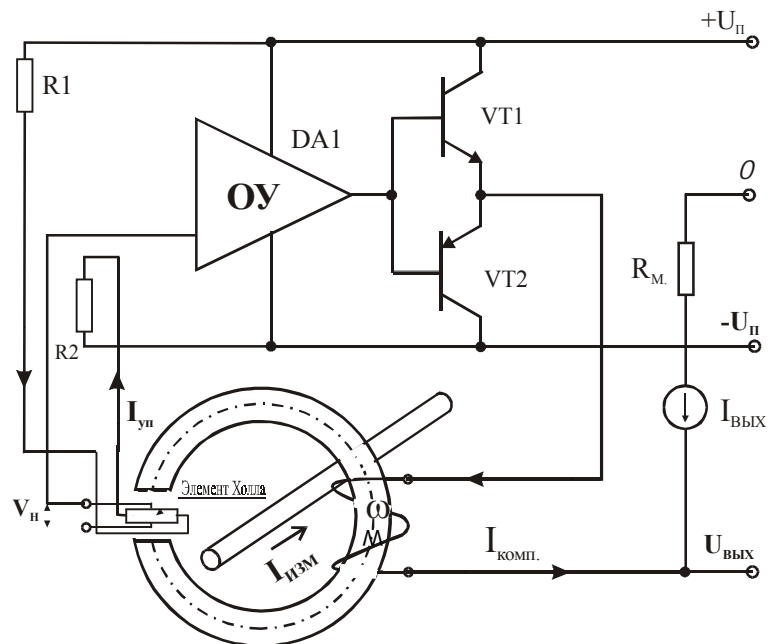
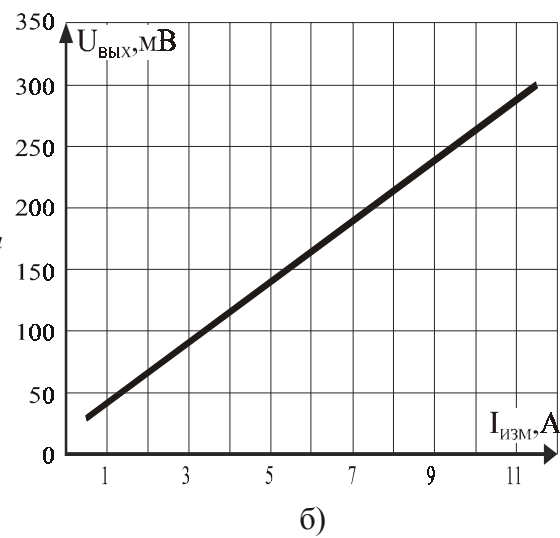


Рис. 5.97. Функциональная схема датчика тока с компенсационной обмоткой (Компенсационная обмотка содержит, как правило, порядка 1000...2000 витков)

Датчики тока с применением магниточувствительных ИС

На рис. 5.98 приведен вариант конструкции простейшего датчика тока с применением магниточувствительной интегральной схем. Данная конструкция не нуждается в подробных пояснениях. На электрическом кабеле устанавливается магнитопровод, имеющий форму тора. В зазоре магнитопровода устанавливается магниточувствительная ИС. МЧМС используется в типовом включении (см. гл. 3 и 12).

При соблюдении размеров деталей конструкции, приведенной на рис.5.98 в зазоре возникает индукция, равная $\sim 0,6$ мТл/А.

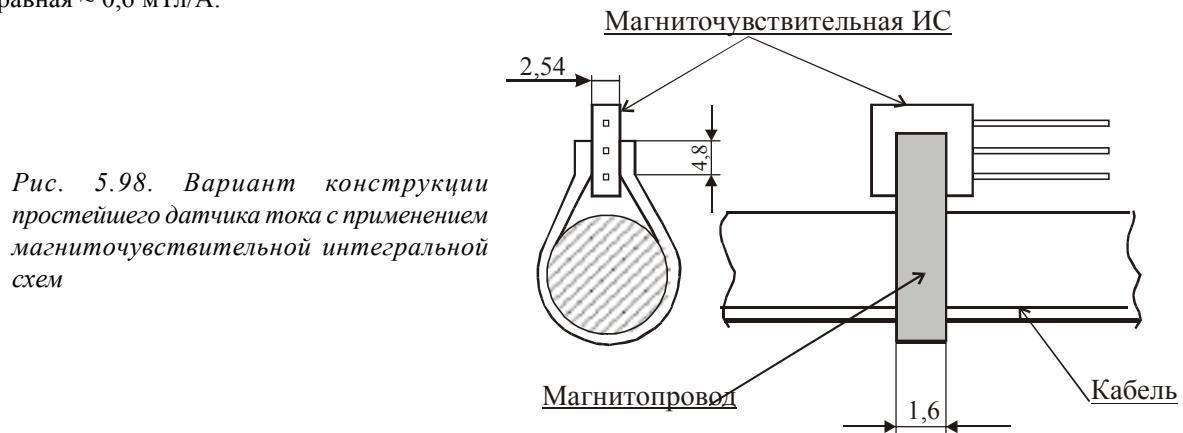


Рис. 5.98. Вариант конструкции простейшего датчика тока с применением магниточувствительной интегральной схем

Датчик тока с применением магнитодиода

На рис. 5.99 приведена конструкция датчика постоянного тока, реализованного с применением магнитодиодов типа КД-301. Конструкция датчика проста и не требует специальных пояснений.

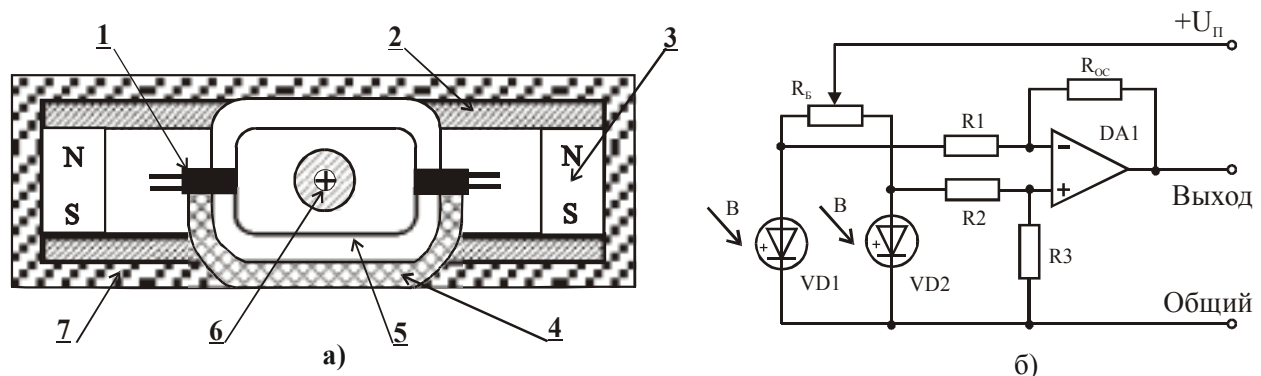


Рис. 5.99. Датчик предельного тока, реализованный с применением магнитодиодов: а – конструкция; б – принципиальная схема: 1 – магнитодиоды; 2 – магнитопровод; 3 – постоянные магниты из магнитокерамики; 4 – диэлектрическая обложка; 5 – тороид с зазорами; 6 – проводник; 7 – корпус из эпоксидной смолы

Датчик (рис. 5.99) работает следующим образом. Измеряемый ток проходит через проводник 6. Магнитодиоды 1 расположены в зазорах тороида 5.

Сигнал с магнитодиодов VD1 и VD2 усиливается операционным усилителем DA1. Нулевой уровень сигнала на выходе датчика устанавливается потенциометром R1 при отсутствии тока в проводнике 5.

Датчик тока реагирует как на величину, так и на направление измеряемого тока. Температурная нестабильность датчика тока составляет менее 5 мВ/на градус Цельсия [9].

Датчики тока с применением магниторезисторов

Линейный датчик тока

На рис. 5.100 показан вариант реализации простейшего датчика тока с использованием тонкопленочного магниторезисторного моста типа AC002-02. Мост, размещенный в микрокорпусе типа SO8, находится непосредственно на проволоочном или печатном проводнике.

Принцип работы такого датчика (рис. 5.100) не требует особых пояснений. Датчик регистрирует рассеянное магнитное поле. Мост питается от источника постоянного тока с напряжением 8–9В, а напряжение сигнала снимается с диагонали моста (выводы 1–5) и может непосредственно измеряться высокоомным вольтметром. На рис. 5.101 приведена электрическая схема и выходная характеристика датчика тока, а в табл. 5.22 даны некоторые его параметры.

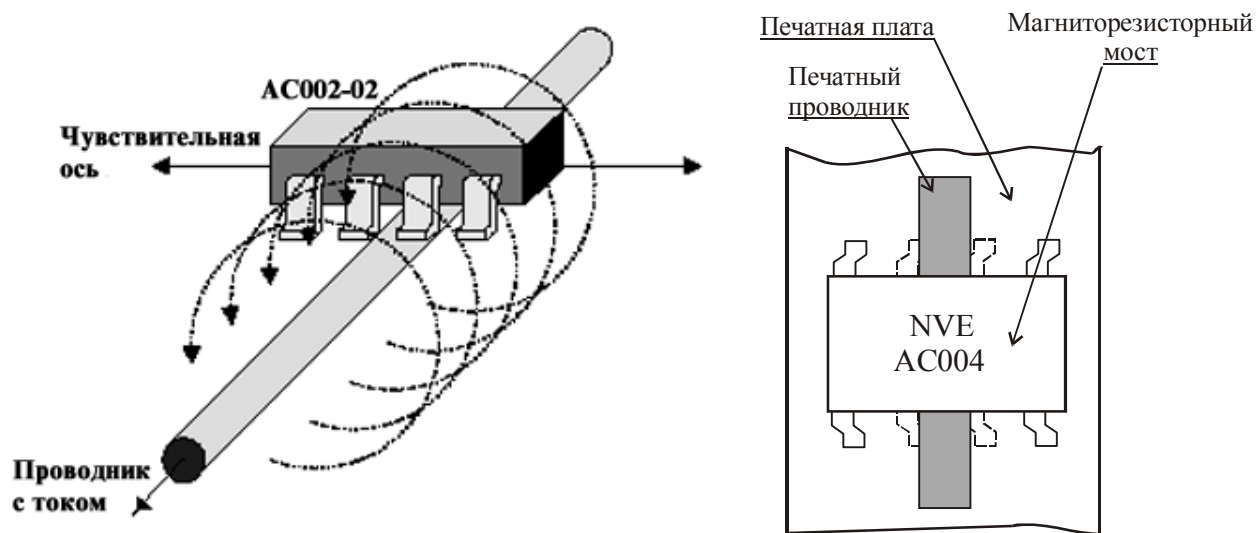


Рис. 5.100. Вариант расположения магниторезисторного моста на проводниках с током: а - на проволоочном проводнике; б - на печатном проводнике

Принцип работы такого датчика (рис-5.100) не требует особых пояснений. Датчик регистрирует рассеянное магнитное поле. Мост питается от источника постоянного тока с напряжением 8...9В, а напряжение сигнала снимается с диагонали моста (выводы 1-5) и может непосредственно измеряться высокоомным вольтметром. На рис. 5.101 приведена электрическая схема и выходная характеристика датчика тока, а в таблице 5.22 приводятся некоторые его параметры.

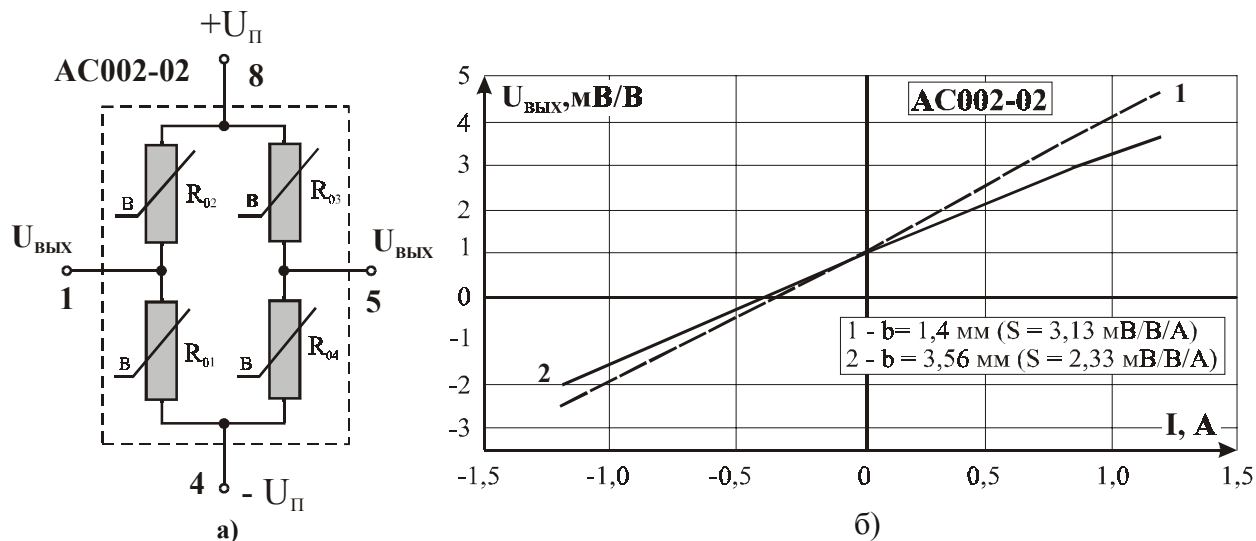


Рис. 5.101. Датчик тока, реализованный с применением тонкопленочного магниторезисторного моста типа AC002-02: а - электрическая схема; б - выходная характеристика

Таблица 5.22. Основные параметры датчика тока, реализованного с применением тонкопленочного магниторезисторного моста типа AC002-02

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип проводника / значение параметра		
		Печатный	Тянутый	Тянутый
1	Ширина или диаметр проводника, мм	7,62	Ø 1,46	Ø 2,54
2	Ток через проводник, А	1	1	1
3	Напряженность магнитного поля, мТл	0,261	0,136	0,078
4	Магнитная чувствительность	40	40	40
5	Токовая чувствительность γ_t , (мВ/В/А)	10,44	5,45	3,13
6	Диапазон рабочих температур, °С	-50...+125	-50...+125	-50...+125

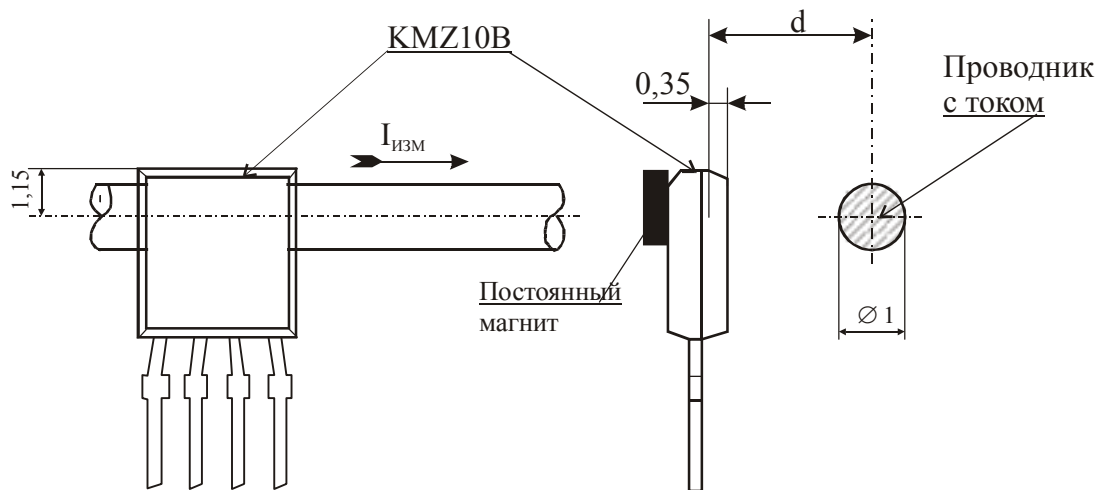


Рис. 5.102. Вариант измерения тока при помощи магниторезисторного моста серии KMZ10

На рис. 5.102 показан вариант использования тонкопленочного магниторезисторного моста типа KMZ10. Принцип работы такого датчика также не требует особых пояснений. Датчик питается от источника постоянного тока с напряжением 5В, а напряжение сигнала снимается с диагонали моста и может непосредственно измеряться высокоомным вольтметром. Постоянный магнит служит для смещения выходной характеристики моста в линейную область.

На рис. 5.103 приведены выходные характеристики датчика тока с использованием моста типа KMZ10.

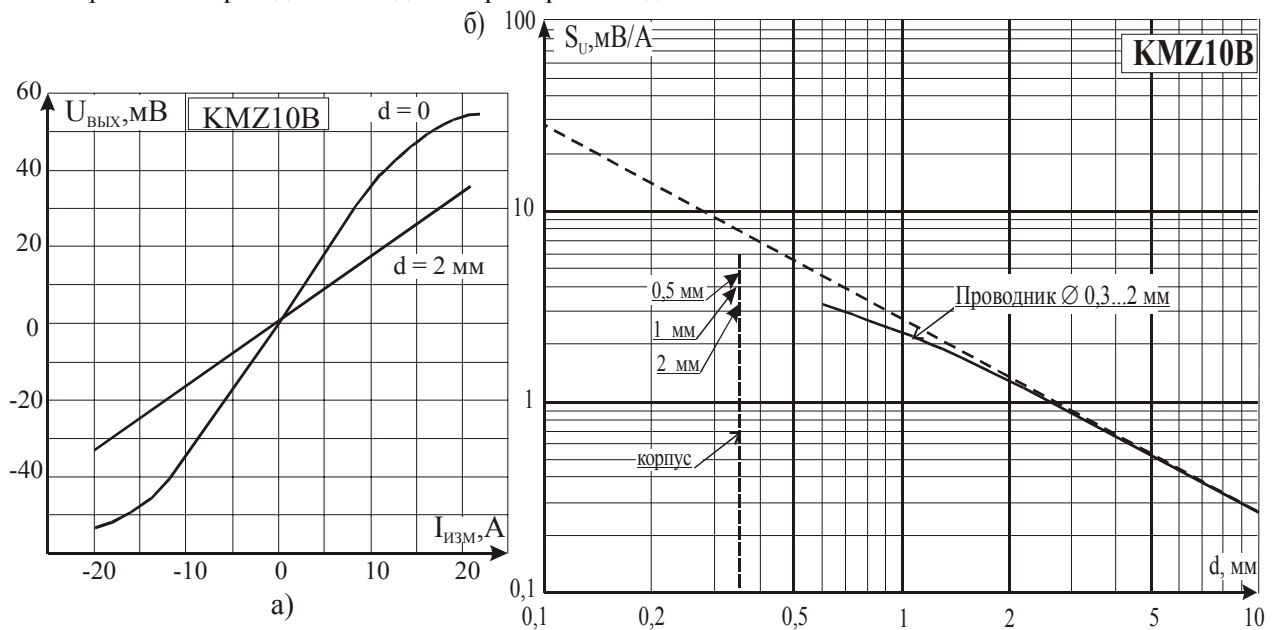


Рис. 5.103. Характеристики моста KMZ10: а - зависимость выходного сигнала ($U_{\text{вых}}$) от измеряемого тока; б - зависимость токовой чувствительности (S_U) от расстояния (d) до проводника при измерении тока

В некоторых случаях при измерении постоянного тока целесообразно использовать два магниторезисторных моста, размещаемых по разные стороны проводника. Пример такого расположения приведен на рис. 5.104. В качестве датчиков тока в данном случае используется тонкопленочный магниторезисторный мост типа KMZ110B, выпускаемый фирмой Philips. Характеристики моста KMZ110B аналогичны характеристикам приборов серии KMZ10. Постоянные магниты служат для смещения характеристик моста в линейную область. Для усиления сигнала с датчика тока может использоваться простейший усилитель на основе ОУ, схема которого приведена на рис. 5.105.

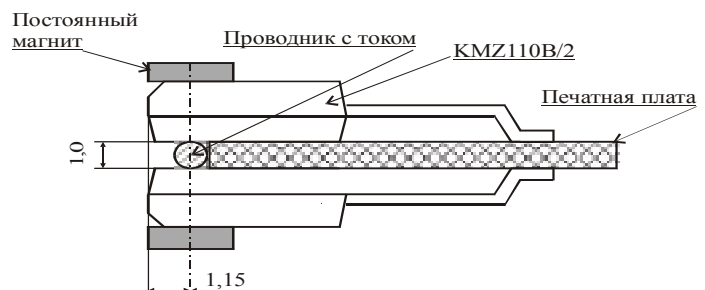
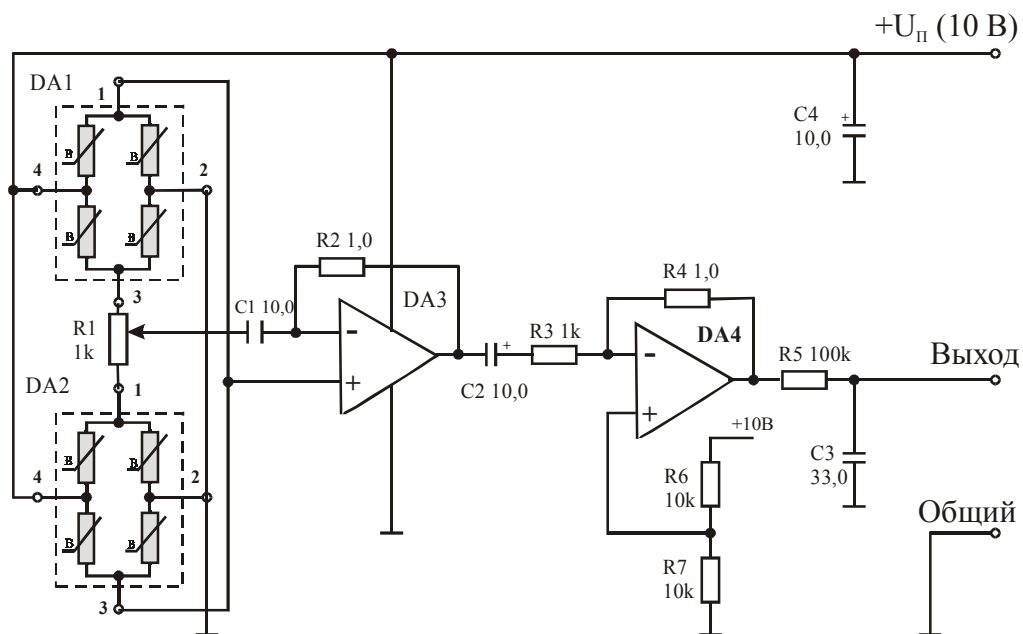


Рис. 5.104. Вариант расположения магниторезисторных мостов типа KMZ110 при измерении тока



DA1,DA2- магниторезисторный мост типа KMZ110B/2
DA3,DA4- операционный усилитель типа NE532

Рис. 5.105. Схема усиления сигнала двоянного магниторезисторного моста

Фирма Zetex Semiconductors специально для измерения постоянного тока выпускает магниторезисторные мосты серии ZMC. В корпусе этих приборов вмонтированы токовые проводники. Основные параметры некоторых типов приборов данной серии приведены в таблице 5.23. [32]

Таблица 5.23. Основные параметры приборов серии ZMC, выпускаемых фирмой Zetex Semiconductors

Тип	Рабочее напряжение, В	Напряжение изоляции, В, не менее	Максимальный измеряемый ток, А	Входное сопротивление моста, кОм	Чувствительность, (мВ/В)/А	Начальное выходное напряжение, мВ/В	Сопротивление токового проводника, мОм	Тип корпуса
ZMC05	12	200	5	1,2...2,2	0,7	±2,0	0,7	SM8
ZMC10	12	2000	10	1,2...2,2	0,5	±2,0	0,7	DIL-14
ZMC20	15	2000	20	1,2...2,2	0,25	±2,0	0,7	DIL-14

Датчик предельного тока с применением магниторезистора

Конструкция второго варианта датчика тока приведена на рис.5.106. Такой датчик может использоваться для измерения сравнительно малых токов (менее 1 А) или напряжений (8...12В).

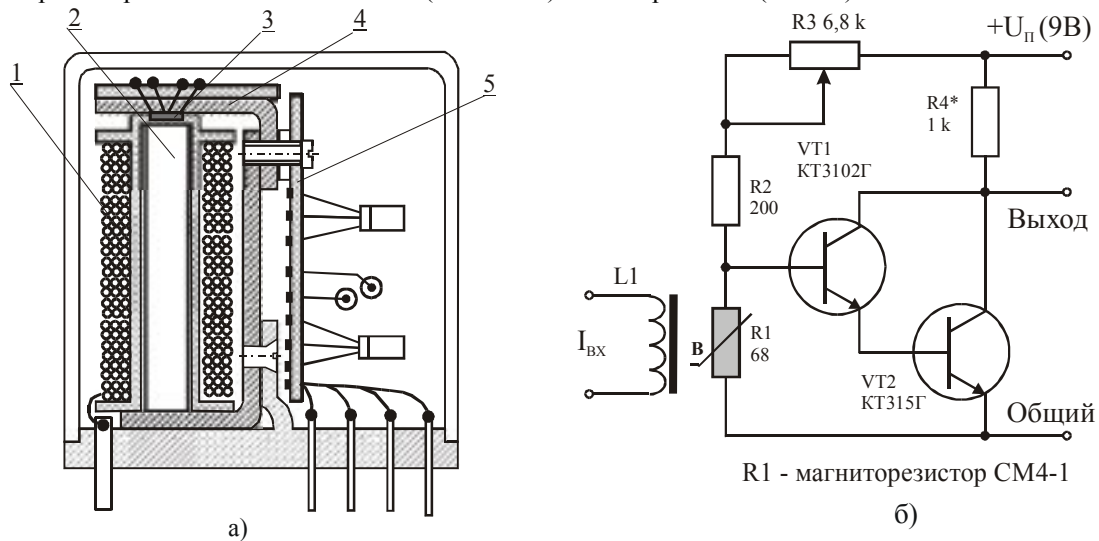


Рис. 5.106. Датчик предельного тока с «токовой» катушкой: а - конструкция; б - принципиальная схема: 1 - токовая катушка; 2 - магнитопровод; 3 - магниторезистор типа СМ4-1; 4 - ярмо; 5 - плата с элементами электронной схемы

В датчике использована магнитная система от реле типа РСМ-1, состоящая из токовой катушки 1 и магнитопровода 2 с ярмом 4. В зазоре магнитной цепи размещается магниторезистор 3. На плате 5 смонтированы детали электронной схемы.

Датчик работает следующим образом. Контролируемый ток или напряжение подаются на обмотку «токовой» катушки. При этом в зазоре между магнитопроводом 2 и ярмом 4 возникает магнитное поле, которое регистрируется «монокристаллическим» магниторезистором типа СМ4-1.

Данную конструкцию (рис.5.106.а) можно использовать как в качестве линейного, так и в качестве цифрового датчика тока. В первом случае используется схема типа преобразователя «ток-напряжение». (Подробнее см. [6]).

При построении цифрового варианта датчика тока может быть использована схема, простейший вариант которой приведен на рис. 5.106.б. Эта схема представляет собой сочетание усилителя тока (VT1) и электронного ключа (VT2). Схема не требует особых пояснений.

В этом случае устройство (рис. 5.106.а) будет выполнять функции датчика предельного тока, который работает следующим образом. При достижении определенного наперед заданного значения тока ($I_{сраб}$) через обмотку токовой катушки будет срабатывать ключ на транзисторе VT2.

Магнитная цепь датчика в этом случае рассчитывается таким образом, чтобы сопротивление магниторезистора 3 увеличивалось в 6...10 раз при прохождении рабочего тока через обмотку катушки 1.

При сопротивлении токовой катушки порядка 750 Ом, ток срабатывания датчика составляет от 8 до 15 мА. [3]

5.7.4. Промышленные образцы магнитных датчиков тока

В настоящее время выпускаются сотни вариантов конструкций магнитных датчиков тока и напряжения. Ведущими фирмами являются LEM Components, F.W. Bell, Honeywell, ABB Control, Fluke, Less EMF Inc., Protec и др.

Однако существует несколько наиболее распространенных конструктивных вариантов ДТиН, которые и будут рассмотрены ниже.

Фирмой LEM выпускаются датчики тока серии NT. Конструкция датчика приведена на рис. 5.107. В этой конструкции в качестве ПМП использован тонкопленочный магниторезисторный мост.

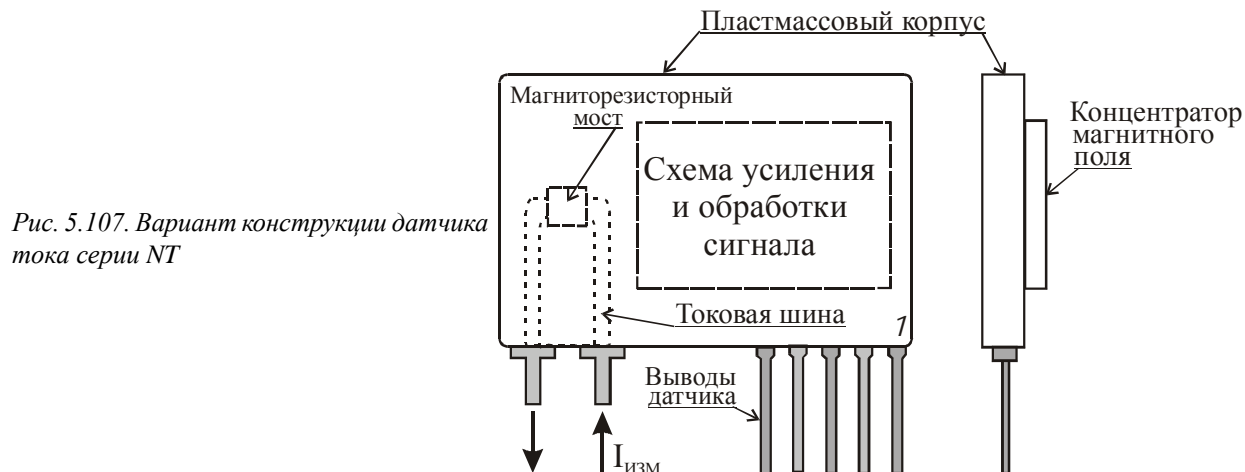


Рис. 5.107. Вариант конструкции датчика тока серии NT

Магниторезисторный мост устанавливается на токовой шине через тонкий слой изолирующего материала. Рядом на миниатюрной печатной плате располагается схема усиления и обработки сигнала, выполненная на интегральных микросхемах в корпусах типа SOIC и бескорпусных пассивных элементах. Все устройство заливается в пластмассовый корпус. В таблице 5.24, в качестве примера приведены некоторые параметры линейных датчиков тока серии NT, выпускаемых фирмой LEM. [36, 52]

Таблица 5.24. Параметры датчиков тока серии NT

№ п/п	Тип прибора	Номинальный входной ток, $I_{ном}$, А	Максимальный ток преобразования, $I_{макс}$, А	Выходной сигнал, В	Начальное выходное напряжение, мВ	Температурный коэффициент изменения начального напряжения, % /°C	Коэффициент нелинейности преобразования, %	Напряжение питания, U_n , В	Ток потребления, $I_{пот}$, мА
1	NT-05	±5	±15	±2,5	±10	±0,2	±0,5	14,25...15,75	40
2	NT-15	±15	±45	±2,5	±10	±0,2	±0,5	14,25...15,75	40
3	NT-25	±25	±75	±2,5	±10	±0,2	±0,5	14,25...15,75	40
4	NT-50	±50	±150	±2,5	±10	±0,2	±0,5	14,25...15,75	40

Другим вариантом является конструкция датчика тока, приведенная на рис. 5.108. Такая конструкция, широко применяемая фирмой Honeywell, получила фирменное название LONET I и LONET II (Linear Output Hall Effect Transducer). [37, 41, 51]



Рис. 5.108. Датчик тока типа LONET I (LONET II): а - конструкция; б - внешний вид

Датчик тока (рис. 5.108) представляет собой торроидальный магнитопровод с поперечным разрезом (пазом), который служит рабочим зазором. В воздушном зазоре устанавливается магниточувствительная интегральная схема. Тор помещен в пластмассовый корпус, в котором имеются элементы крепления. Основные параметры таких датчиков тока полностью определяются параметрами и характеристиками используемых магниточувствительных микросхем.

Фирмой Honeywell на основе магниточувствительных микросхем серий 9SS и SS9 выпускаются линейные датчики тока серий CSLA1, CSLA2, CSLB1 и др.

В таблице 5.25 приводятся некоторые параметры линейных датчиков тока серии CSLA1, выпускаемых фирмой Honeywell.

Таблица 5.25. Параметры линейных датчиков тока серии CSLA1

№ п/п	Тип прибора	Максимальный измеряемый ток, $I_{\text{макс}}$, А	Чувствительность, мВ/А х вит.	Температурный коэффициент изменения начального напряжения, % /°C	Напряжение питания, U_n , В	Максимальный ток потребления, $I_{\text{пот макс}}$, мА	Максимальные габаритные размеры, мм
1	CSLA1C	57	49,6±5,81	±0,05	от 8 до 16	19	36,5 x 34,3 x 10,4
2	CSLA1CE	75	39,4±4,41	±0,05	от 8 до 16	19	36,5 x 34,3 x 10,4
3	CSLA1DE	75	39,1±4,81	±0,05	от 8 до 16	19	30,5 x 36,4 x 11,4
4	CSLA1CF	100	29,7±2,71	±0,05	от 8 до 16	19	36,5 x 34,3 x 10,4
5	CSLA1D	120	24,6±2,11	±0,05	от 8 до 16	19	30,5 x 36,4 x 11,4
6	CSLA1CH	150	19,6±1,81	±0,05	от 8 до 16	19	36,5 x 34,3 x 10,4
7	CSLA1DJ	225	13,2±1,21	±0,05	от 8 до 16	19	30,5 x 36,4 x 11,4

На рис. 5.109 приведена конструкция более сложного датчика тока. Основой таких датчиков также является торроид с линейной микросхемой, закрепленный на печатной плате, содержащей необходимую электронику. В них предусмотрена балансировка «0» и регулировка чувствительности прибора.

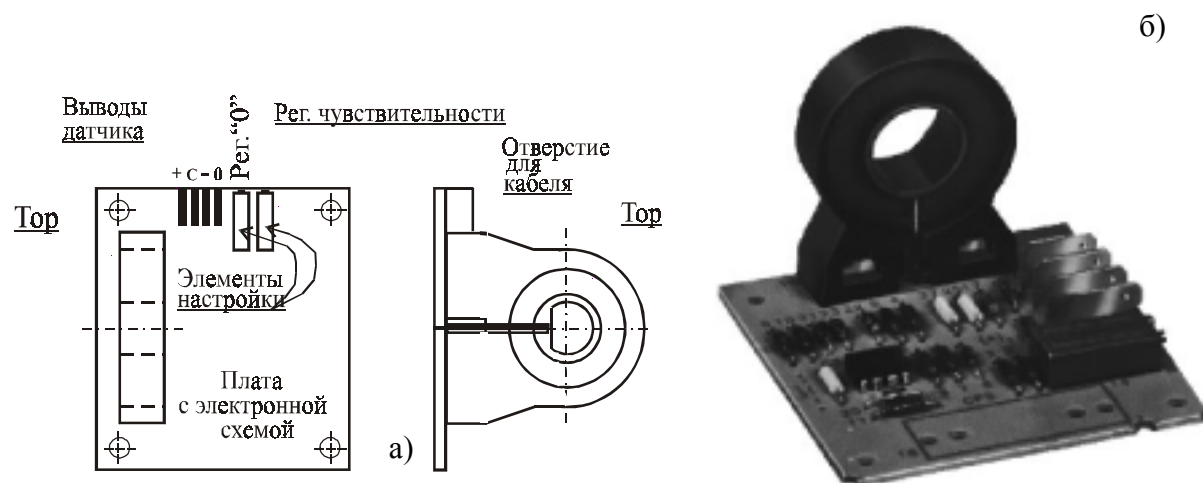


Рис. 5.109. Линейный датчик тока с регулируемой чувствительностью: а - вариант конструкции; б - внешний вид

Такие устройства, выпускаемые фирмой Honeywell (серии CSLB1, CSLB2, CSLB3, CSDA1), носят название регулируемых (программируемых) линейных датчиков тока (Adjustable Linear Current Sensors). Аналогичные приборы выпускаются и др. фирмами, например, F. W. Bell, LEM Components, Ohio Semitronics Inc. и т.п.

В таблице 5.26 приводятся некоторые параметры программируемых линейных датчиков тока серии CSLB1, выпускаемых фирмой Honeywell.

Таблица 5.26. Параметры программируемых линейных датчиков тока серии CSLB1

№ п/п	Тип прибора	Максимальный измеряемый ток, $I_{\text{макс}}$, А	Диапазон программирования параметров при $U_{\text{п}} = 12 \text{ В}$				Диаметр отверстия под токоведущую шину, мм	Максимальные габаритные размеры, мм
			Минимальная чувствительность, мВ/А х вит	Диапазон преобразования при минимальной чувствительности, А	Максимальная чувствительность, мВ/А х вит.	Диапазон преобразования при максимальной чувствительности, А		
1	CSLB1AD	57	53	0,57... 57	90	0,33... 33	7,6	68,6х63,5х35,6
2	CSLB1BE	75	40	0,75... 75	75	0,4... 40	13,6	68,6х63,5х44,5
3	CSLB1AF	100	30	1,0... 100	55	0,55... 55	7,6	68,6 х 63,5х 35,6
4	CSLB1BG	120	25	1,2... 120	46	0,65... 65	13,6	68,6 х 63,5х 44,5
5	CSLB1AH	150	20	1,5... 150	38	0,8... 80	7,6	68,6 х 63,5х 35,6
6	CSLB1BJ	225	13	2,25... 225	26	1,15... 115	13,6	68,6 х 63,5х 44,5
7	CSLB1BK	325	9	3,25... 325	16	1,85... 185	13,6	68,6 х 63,5х 44,5

Для контроля сравнительно малых токов широко используются датчики предельного тока с токовой катушкой. На рис.5.110. в качестве примера приведены конструкция и внешний вид датчика с токовой катушкой.

Датчик может содержать не одну, а несколько катушек. Это позволяет регулировать ток срабатывания ДТ в широких пределах. Такие датчики отличаются компактностью. Они выпускаются многими зарубежными фирмами. Например, фирма Honeywell выпускает датчики тока серии CS. В таблице 5.27 приводятся отдельные характеристики датчиков этой серии.

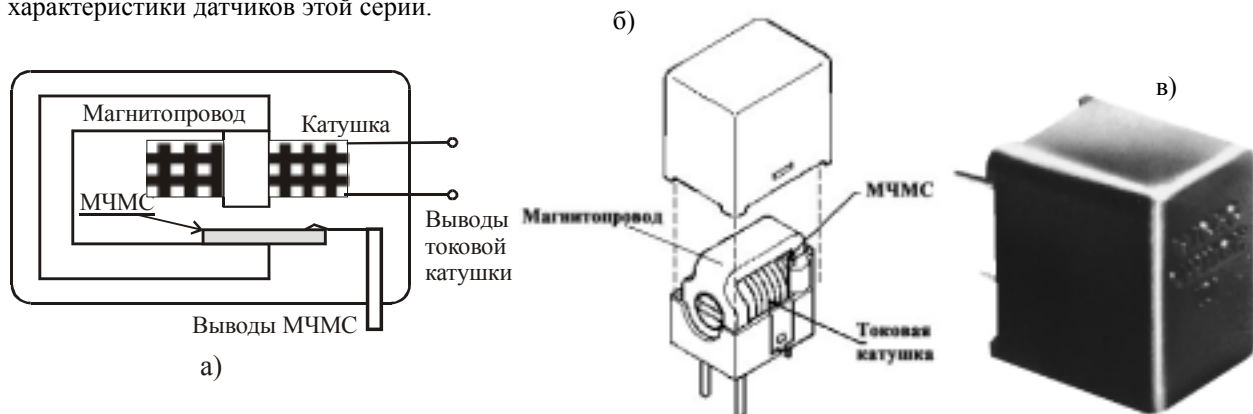


Рис. 5.110. Датчика с токовой обмоткой: а, б - вариант конструкция; в - внешний вид

Таблица 5.27. Параметры датчиков предельного тока серии CSDD

№ п/п	Тип прибора	Ток срабатывания при температуре 25 °С, А	Ток отпущения при температуре 25 °С, А	Параметры токовой катушки		Температурный коэффициент чувствительности, % / °С	Максимальные габаритные размеры, мм
				Сопротивление, мОм	Индуктивность, мкГн		
1	CSDD1ED	3,5	2,6	8	7	от +0,042 до -0,158	14,7 х 17,0 х 12,7
2	CSDD1EC	5	3,8	5	4	от +0,042 до -0,158	14,7 х 17,0 х 12,7
3	CSDD1EE	6,5	4,9	4	4	от +0,042 до -0,158	14,7 х 17,0 х 12,7
4	CSDD1EF	9	6,8	3	3	от +0,042 до -0,158	14,7 х 17,0 х 12,7
5	CSDD1EG	10	7,6	3	3	от +0,042 до -0,158	14,7 х 17,0 х 12,7
6	CSDD1EH	15	11,4	2	3	от +0,042 до -0,158	14,7 х 17,0 х 12,7

Датчики с разъёмным магнитопроводом

При установке датчиков тока на проложенные и подключенные кабели очень часто используются ДТ с разъёмным магнитопроводом. В таких приборах концентратор магнитного поля (магнитопровод) состоит из двух половин, соединённых шарниром (или петлёй). На одной из половин концентратора закрепляется дискретный элемент Холла или магниточувствительная интегральная схема. Такая конструкция может содержать и другую необходимую электронику.

На рис 5.111 приведен один из вариантов конструкции разъёмного датчика тока, выпускаемых фирмой F.W.Bell.

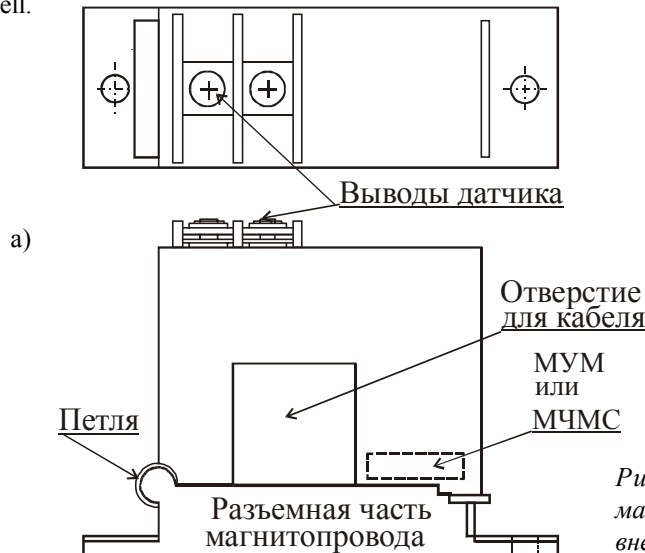


Рис.5.111. Датчик тока с разъёмным магнитопроводом: а - вариант конструкции; б - внешний вид

Принцип применения датчиков с разъёмным магнитопроводом предельно прост. Для размещения датчика на контролируемом проводнике одна из половин (подвижная) магнитопровода отводится в сторону (вверх или вниз - в зависимости от конструкции). Затем проводник устанавливается на неподвижной части магнитопровода, а первая его половина возвращается обратно и фиксируется специальным устройством.

Токоизмерительные клещи

Другим вариантом бесконтактных датчиков тока с разъёмным магнитопроводом являются, т.н. **токоизмерительные клещи**. Возможные варианты конструкции таких клещей приведен на рис. 5.112.



Рис. 5.112. Варианты конструкции токоизмерительных клещей

Конструкция токоизмерительных клещей может использоваться и в автономном режиме. Для чего она может содержать миниатюрный источник питания (например, батарею 6...9В). В этом случае для оценки результатов измерения тока используются внешние цифровые измерительные приборы.

Более совершенные модели электронных клещей конструктивно объединены с цифровыми приборами и поэтому позволяют проводить прямые измерения тока.

Размах губок (разъёмной части) клещей для разных типов приборов позволяет охватить токонесущий проводник диаметром от 20 до 90 мм. [21, 42, 47]

Еще одной разновидностью датчика разъёмным магнитопроводом служит, т.н. «навесной» вариант. Конструкция такого прибора приведена на рис. 5.113.

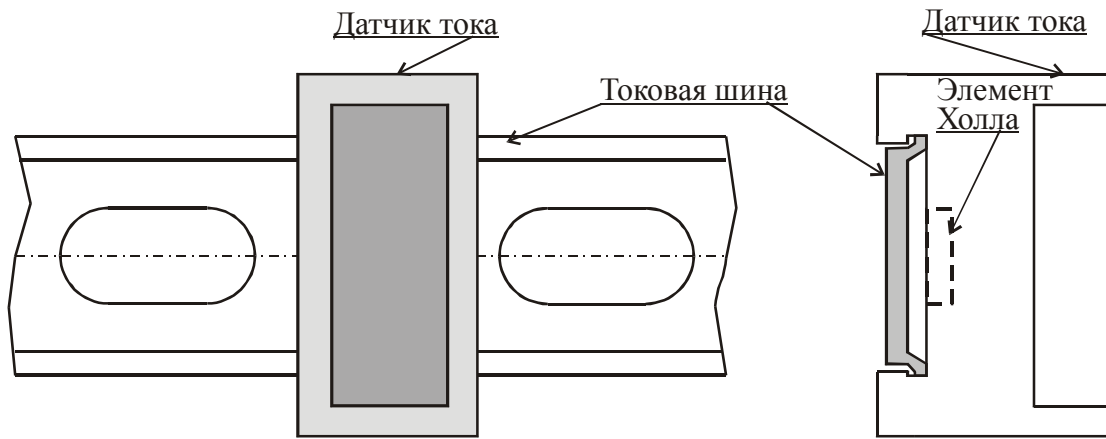


Рис. 5.113. Вариант конструкция «навесного» датчика тока

Датчик (рис. 5.113) навешивается непосредственно на стандартную токнесущую шину. Электронная начинка такого прибора может быть самой разнообразной и зависит от решения конкретной технической задачи. [47]

Основные параметры и характеристики наиболее известных типов датчиков тока и напряжения, выпускаемых ведущими зарубежными производителями приводятся в главах 18 и 19 тома 2.

5.8. Магнитные датчики в современных электродвигателях

Магнитные датчики находят массовое применение в составе современных электродвигателей в качестве датчиков положения ротора (ДПР), а также в качестве датчиков скорости и направления вращения ротора (ДСВР).

Коллекторные двигатели постоянного тока обычно применяются в тех случаях, когда необходимо регулировать частоту вращения в широком диапазоне частот. Однако наличие коллектора связано со значительным снижением надежности работы двигателя и эксплуатационными неудобствами.

С освоением промышленного выпуска интегральных преобразователей магнитного поля были разработаны и освоены в серийном производстве новые типы электродвигателей, сочетающих в себе преимущества коллекторных двигателей постоянного тока и бесколлекторных двигателей переменного тока. Роль коллектора в таких двигателях выполняют электронные ключи, управляемые датчиками положения ротора. Такие двигатели получили наименование **вентильных (ВЭД)** или **прямовыводных (ПДПТ) электродвигателей постоянного тока**.

За рубежом вентильные электродвигатели известны под названием «Brushless Motors» – бесщеточный мотор. **Бесколлекторные двигатели** постоянного тока обладают следующими преимуществами:

- плавностью хода и бесшумностью работы вплоть до очень высоких оборотов, обусловленные отсутствием щеток и пазов (как в статоре, так и в роторе);
- более чем десятикратным увеличением срока эксплуатации, определяемого сроком службы подшипников, а не коллектора, как у обычных двигателей постоянного тока (до 10 тыс. часов);
- отсутствием щеток и коллектора, предопределяющее очень легкие условия запуска двигателя;
- отсутствием контактных шумов и, следовательно, помехозащитных устройств;
- отсутствием искрообразования, делающие двигатель пригодным для работы во взрывоопасной среде;
- отсутствием в двигателе элементов, свойства которых меняются с течением времени, что позволяет даже после многолетней эксплуатации двигателя сохранять неизменными свои исходные характеристики.

Кроме того, конструкция и электронная схема управления (ВЭД) позволяют осуществлять регулировку частоты вращения в широком диапазоне, а также поддерживать заданное число оборотов строго постоянным. Верхний предел частоты вращения обусловлен чисто механическими возможностями двигателя и может быть доведен до 60000 оборотов в минуту и более.

Вентильные электродвигатели постоянного тока нашли широкое применение в бытовой аудио и видеоаппаратуре, персональных ЭВМ, в автомобильной технике, бытовых приборах, в медицинской и военной технике и т.д.

Зарубежными производителями выпускается весьма широкая номенклатура электродвигателей, использующих магнитные датчики. Например, японская фирма Nides выпускает бесщеточные двигатели (моделей 1700-00FX и 1700-00EX и вентиляторы (D04G-12TH) на их основе; американская фирма Igthcil также выпускает вентиляторы на б/к двигателях (LT1001L); японская фирма JVS Victor выпускает серию двигателей для видеотехники (EF-10B, EF-10A, EF-09A, SF-20D, SF-23A, SP-2A) и двигатели для дисководов (MC955A, SD0 4C, EF05A, SF21A, ES04A, SS02B); американская фирма NMT Technologies также выпускает двигатели для дисководов (LM-3H-01, LM-30-S1-YM, LM-3H-04, LM-5H-04); японская фирма Sanyo выпускает б/к двигатели для плееров и диктофонов (26FD 05-18, 25IC-01-21), а также двигатели для дисководов (FD77 и FM76) и вентиляторы для компьютеров (205AOF, 205BOH, 205BZH, 205BOHF, CLF-A3015 24-30, CLF-A3015 12-30) и т.д.

Для бытовой радиоэлектронной аппаратуры наибольшее распространение получили вентильные электродвигатели со следующими основными характеристиками:

- рабочее напряжение от 3 до 24В;
- мощность на валу от 0,1 до 5Вт;
- скорость вращения от 300 до 6000 оборотов в минуту.

Кроме того, в последние годы все большее распространение получают **индукторные** (бесколлекторные) двигатели переменного тока, принцип действия которых аналогичен ВЭД. Скорость вращения таких электродвигателей может устанавливаться в широких пределах: от единиц до нескольких тысяч оборотов в минуту.

5.8.1. Принцип работы бесколлекторного электродвигателя постоянного тока

Конструкция современного вентильного двигателя очень близка к конструкции двигателя переменного тока, известной под названием синхронного двигателя с постоянными магнитами. Обмотки якоря являются частью статора, а ротор состоит из одного или нескольких постоянных магнитов. Обмотки вентильного двигателя выполняются такими же, как и обмотки многофазного двигателя переменного тока. При помощи специальной схемы управления в обмотках двигателя создается вращающееся магнитное поле, которое и приводит во вращение ротор электродвигателя. Надежный запуск двигателя должен происходить при любом исходном положении ротора.

Вентильные двигатели постоянного тока отличаются от синхронных двигателей переменного тока тем, что первые содержат некоторые технические средства определения положения ротора (или магнитных полюсов) с целью выработки сигналов управления полупроводниковыми ключами («заменяющими» коллектор).

Положение ротора определяется специальным датчиком (ДПР), наибольшее распространение в качестве которых получили дискретные элементы Холла и магнитоуправляемые ИС на их основе.

Принцип определения положения ротора при помощи элемента Холла

На рис. 5.114 в виде четырехполюсника показана эквивалентная схема элемента Холла, использованного в качестве датчика угла поворота.

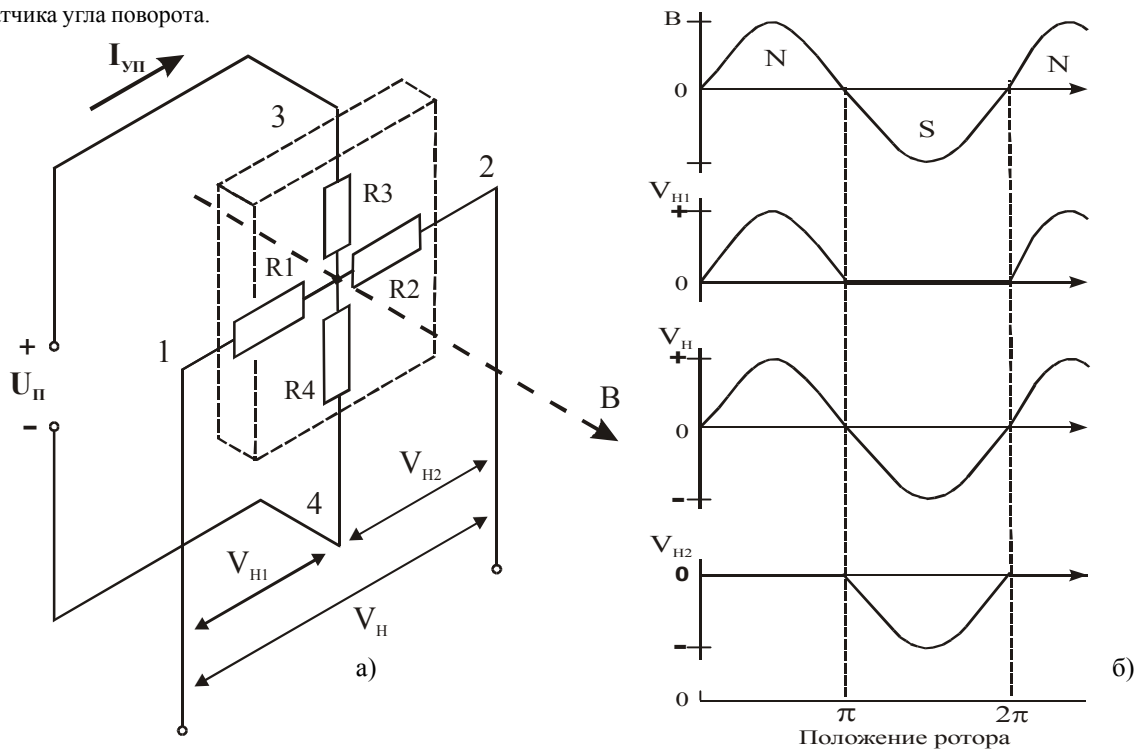


Рис. 5.114. Элемент Холла, как датчик положения ротора: а - эквивалентная схема; б - энтюры напряжений на выходе

Схема (рис. 5.114) работает следующим образом. При протекании тока управления $I_{\text{уп}}$ от вывода 3 к выводу 4 элемента Холла, помещенного в магнитное поле, вектор индукции которого перпендикулярен плоскости элемента, на выводах 1 и 2 элемента возникает эдс-Холла V_H . Если предположить, что $R_1 = R_2$ и $R_3 = R_4$ и принять вывод 4 за общую точку схемы, то потенциалы выводов 1 и 2 будут соответственно равны $V_H/2$ и $-V_H/2$. Далее при изменении направления магнитного поля меняется полярность наводимого на элементе напряжения, что показано на рис. 5.114.б. Поэтому если разместить элемент Холла вблизи ротора с постоянным магнитом, то этот элемент достаточно точно выявляет положение полюсов и значение магнитной индукции, генерируя выходные напряжения V_{H1} и V_{H2} .

На рис. 5.115 приведены схема и устройство простейшего бесколлекторного двухфазного двигателя постоянного тока, построенного с применением элемента Холла в качестве датчика положения ротора. Ротором электродвигателя служит двухполюсный магнит.

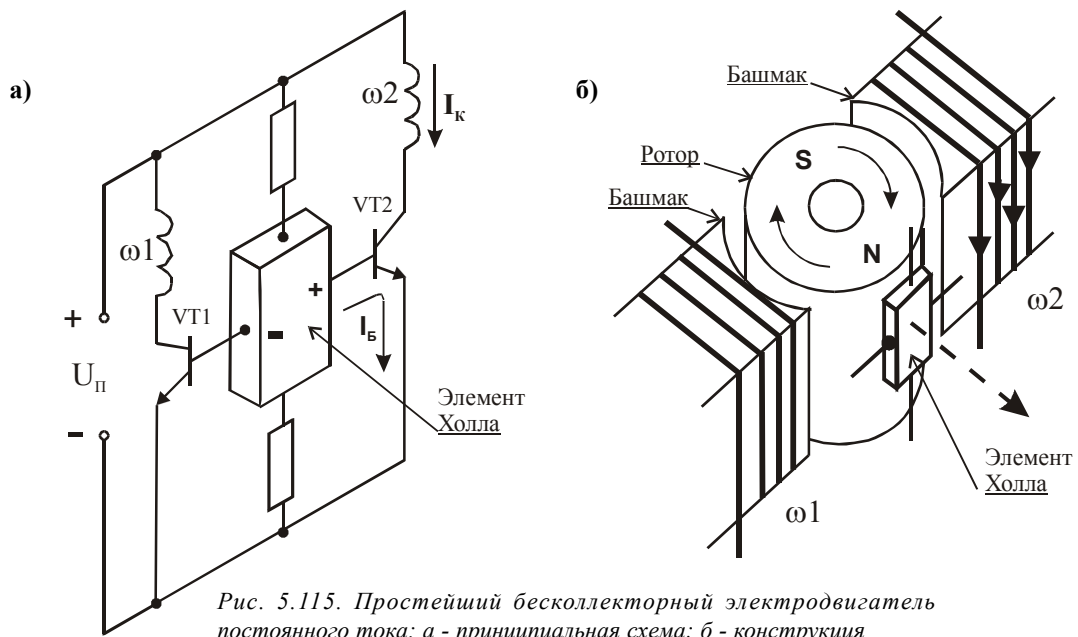


Рис. 5.115. Простейший бесколлекторный электродвигатель постоянного тока: а - принципиальная схема; б - конструкция

Для управления обмотками $\omega 1$ и $\omega 2$ выходные сигналы с элемента Холла поступают на базу транзисторов VT1 и VT2. При этом рассмотрим три основных положения ротора, показанных на рис. 5.116:

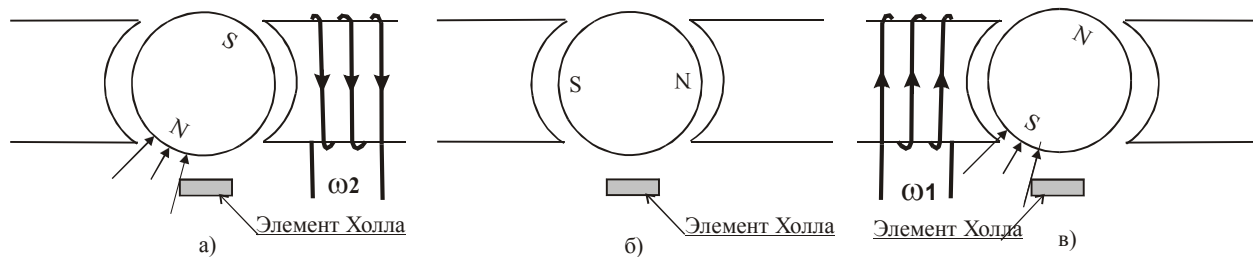


Рис. 5.116. Создание электромагнитного момента и коммутация обмоток бесколлекторного ЭД при трех основных положениях ротора

а – элемент Холла определяет северный полюс постоянного магнита N ротора и подключает обмотку $\omega 2$ таким образом, что на полюсном башмаке обмотки образуется южный полюс, вызывающий вращение ротора против часовой стрелки (рис. 5.116а);

б – элемент Холла выходит из-под действия магнитного поля, что приводит к запираанию обоих транзисторов VT1, VT2 и обесточиванию обмоток $\omega 1$ и $\omega 2$. Ротор продолжает по инерции вращаться против часовой стрелки (рис. 5.116б);

в – элемент Холла определяет южный полюс S ротора и подключает обмотку $\omega 1$ таким образом, что на полюсном башмаке обмотки образуется южный полюс, притягивающий северный полюс S ротора, продолжая вращение ротора против часовой стрелки (рис. 5.116в).

Двухфазный двигатель с применением одного элемента Холла и двух обмоток является самым простым и, следовательно, самым дешевым типом ВЭД. Однако такой электродвигатель имеет следующие недостатки:

- наличие двух «мертвых точек», при которых элемент Холла не может определить направление магнитного поля, а значит, в обмотках не протекают токи, создающие электромагнитный момент. Следовательно, если двигатель имеет фрикционную нагрузку, то существует вероятность остановки его ротора в «мертвой точке». При этом отсутствует возможность запуска двигателя; при малом значении момента трения ротор может пройти по инерции «мертвую точку»;
- при малом значении электромагнитного момента мала и противо-ЭДС, что вызывает увеличение тока и значительные потери в обмотках. Поэтому падает КПД двигателя, являющийся отношением выходной механической мощности к потребляемой электрической мощности двигателя.

Для устранения «мертвых точек» используются специальные методы. Один из методов связан с использованием многофазной конструкции ВЭД, другой – с использованием пространственного гармонического магнитного поля и т.д. (Подробнее см. [14].)

5.8.2. Конструкции бесколлекторных электродвигателей постоянного тока

В настоящее время существует огромное число конструкций бесколлекторных двигателей постоянного тока различного назначения. На рис. 5.117 в качестве примера приведена наиболее распространенная конструкция двигателя ведущего вала (ДВВ) видеомагнитофона.

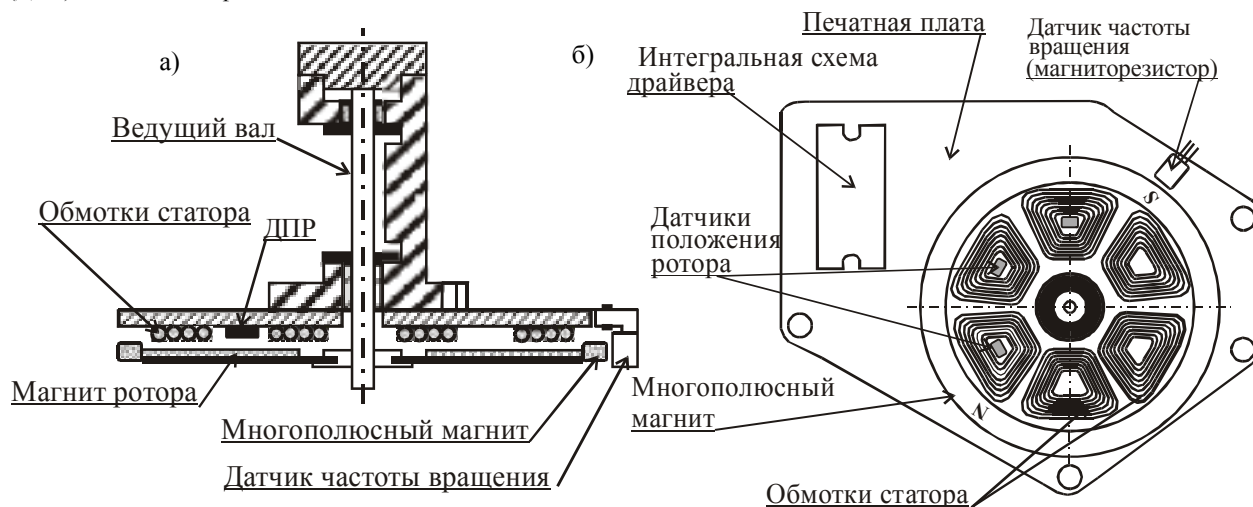


Рис. 5.117. Бесколлекторный электродвигатель ведущего вала видеомагнитофона: а – конструкция; б – статор

Двигатель ВВ представляет собой плоскую конструкцию ПДПТ с осевым рабочим зазором. Все основные элементы двигателя размещены на печатной плате. К особенностям двигателя можно отнести наличие магнитной системы торцевого типа с магнитным потоком, направленным вдоль оси вращения двигателя, и плоских катушек статора, расположенных между магнитом ротора и ярмом статора (рис. 5.120.б).

Вращающий момент в двигателе создается в результате взаимодействия магнитного потока в промежутке между полюсами магнита ротора и основанием статора с проводниками обмотки, по которым протекает электрический ток. Управление коммутацией катушек обмотки статора в зависимости от положения полюсов магнита ротора осуществляется специальной интегральной схемой (драйвером) по сигналам датчиков положения ротора. Датчики положения ротора (дискретные элементы Холла или магнитоуправляемые ИС) располагаются внутри плоских катушек статора. В зависимости от конструкции двигателя количество ДПР может меняться с 2-х до 3-х и более. (См. рис. 5.117.б)

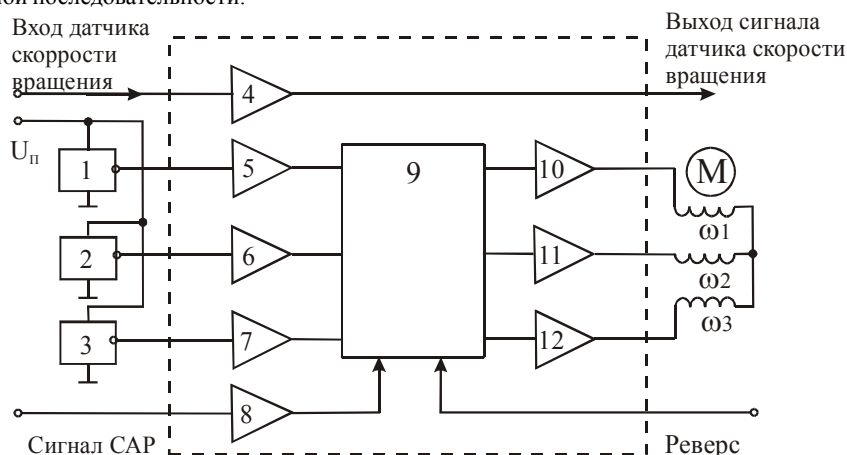
Контроль скорости вращения ротора осуществляется специальным датчиком, состоящим из многополюсного магнита, размещенного на роторе двигателя, и тонкопленочного магниторезистора, укрепленного на печатной плате (рис. 5.117.б) на малом (0,1–0,3 мм) расстоянии от магнита.

На практике нашли применение двух- и трехфазные двигатели. В таких двигателях ротор, как правило, имеет 6–8 полюсов. Сам магнит обычно изготавливают из магнитокерамики. Катушки каждой фазы имеют многослойную намотку одним или двумя проводами с числом витков 60–100. Катушки статора после намотки пропитывают лаком, получая практически плоскую монолитную бескаркасную обмотку, и приклеивают к печатной плате, расположенной на основании двигателя.

Большое число катушек статора, как и полюсов магнита ротора, способствует равномерности скорости вращения. Однако наиболее распространены ПДПТ с небольшим числом катушек, так как увеличение их количества повышает стоимость конструкции самой катушки, статора и схемы драйвера, а следовательно, и стоимость всего узла.

На рис. 5.118 приведена упрощенная структурная схема бесколлекторного электродвигателя с электронным коммутатором, которая не требует особых пояснений. Основными функциями электронного коммутатора являются следующие: усиление и обработка сигналов, поступающих с ДПР и датчика скорости вращения; коммутация по сигналам ДПР и сигналам управления с выхода системы автоматического регулирования и процессора системного контроля видеомагнитофона токов статора в заданные моменты времени и в заданной последовательности.

Рис. 5.118. Структурная схема трехфазного прямовыводного двигателя постоянного тока: 1, 3 – магнитоуправляемые ИС; 4 – усилитель сигнала датчика скорости вращения; 5, 6, 7 – усилители-формирователи сигналов ДПР; 8 – усилитель сигнала управления от системы автоматического регулирования; 9 – электронный коммутатор; 10, 11, 12 – выходные усилители мощности



Кроме электронного коммутатора в состав ПДПТ входят усилители сигналов положения ротора, усилитель-формирователь сигнала датчика скорости вращения ротора, а также логическая схема, которая управляет режимами работы электронного коммутатора по сигналу управления системы автоматического регулирования (САР) и командами с выхода ПСК видеомagneитофона.

Схема управления ПДТП может размещаться как внутри корпуса двигателя, так и снаружи в виде отдельного блока, модуля на печатной плате или специализированной интегральной микросхемы. На рис. 5.119 и 5.120 в качестве примера приведены схемы ПДТП с использованием специальных интегральных схем-драйверов. Схемы не требуют особых пояснений.

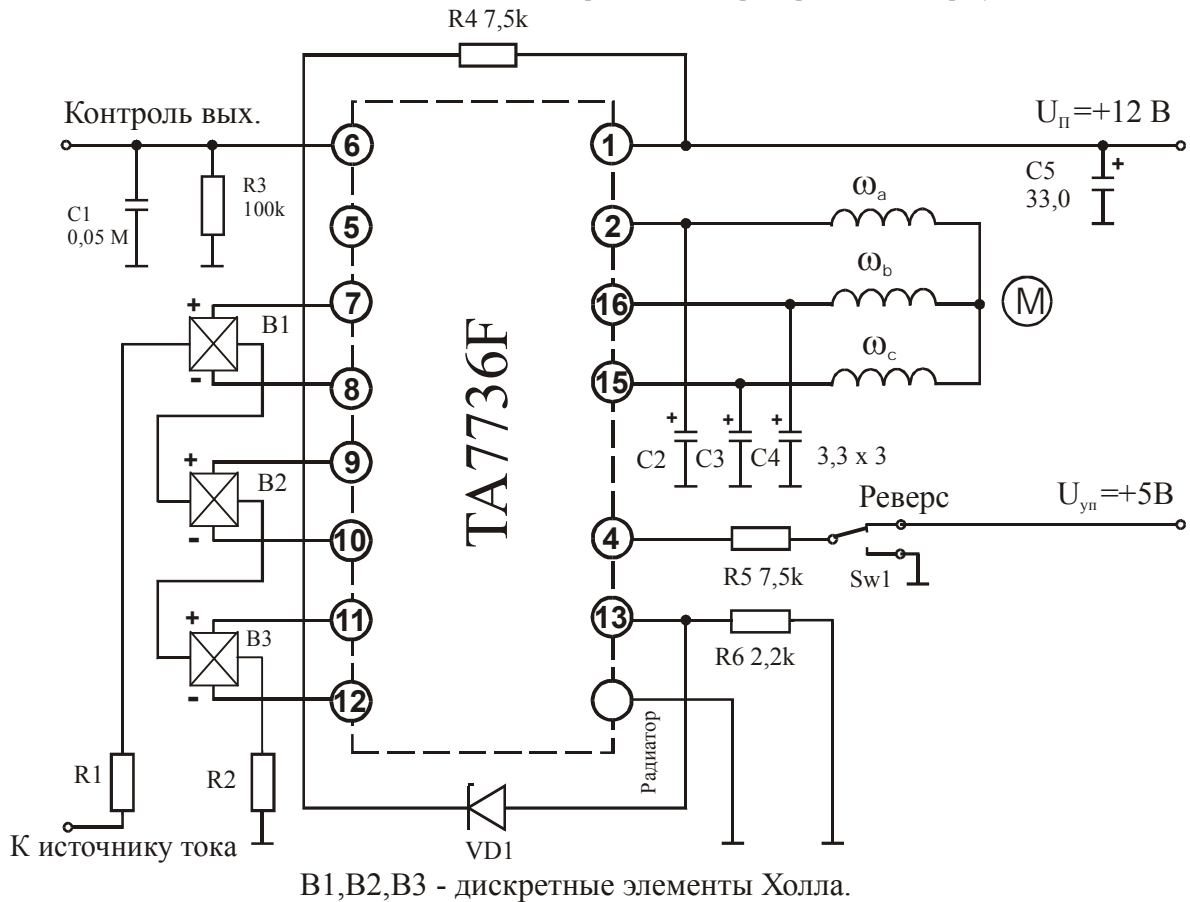


Рис. 5.119. Электрическая схема трехфазного ПДПТ с использованием ИС драйвера типа TA7736F и дискретных элементов Холла в качестве ДПР

Микросхема ТА7736F драйвера 3-фазного реверсивного электродвигателя постоянного тока размещена в стандартном 16-выводном корпусе типа HSOP 16-P-300 с габаритами 13,5×6,4×2,85 мм. В качестве датчиков положения ротора используются дискретные датчики Холла. Микросхемы выпускаются фирмой Toshiba. Напряжение питания схемы –26 В, ток нагрузки –1,0 А, рассеиваемая мощность –0,9 Вт. Диапазон рабочих температур от –30 до +75 °С. [15]

На рисунке 5.120.приведена схема бесколлекторного 3-х фазного электродвигателя, реализованного с использованием ИС драйвера типа LS7261 и магнитоуправляемых микросхем типа UGS 3120. Для управления обмотками электродвигателя используются мощные дискретные транзисторы.

На рис. 5.121 в качестве примера приведена схема бесколлекторного трехфазного электродвигателя с использованием ИС драйвера типа UDN2936 и магнитоуправляемых ИС. Микросхемы выпускаются фирмой Allegro. Микросхема UDN2936 драйвера 3-х фазного реверсивного электродвигателя размещена в стандартном 12-ти выводном корпусе типа HSIP 12-P с габаритными размерами $32 \times 15 \times 4,6 \text{ мм}^3$. Напряжение питания схемы 14...45В, ток нагрузки до $\pm 2,0 \text{ А}$. Диапазон рабочих температур от -20 до $+85^\circ \text{C}$.

Электронная схема драйвера позволяет использовать как дискретные элементы Холла, так и магнитоуправляемые интегральные схемы.

Схемы выпускаются в двух вариантах UDN2936W и UDN2936W-120.

Микросхемы типа UDN2936W предназначена для использования в электродвигателях с 30° расположением датчиков положения ротора, а микросхемы типа UDN2936W-120 - для ЭД с 120° расположением ДПР. [30]

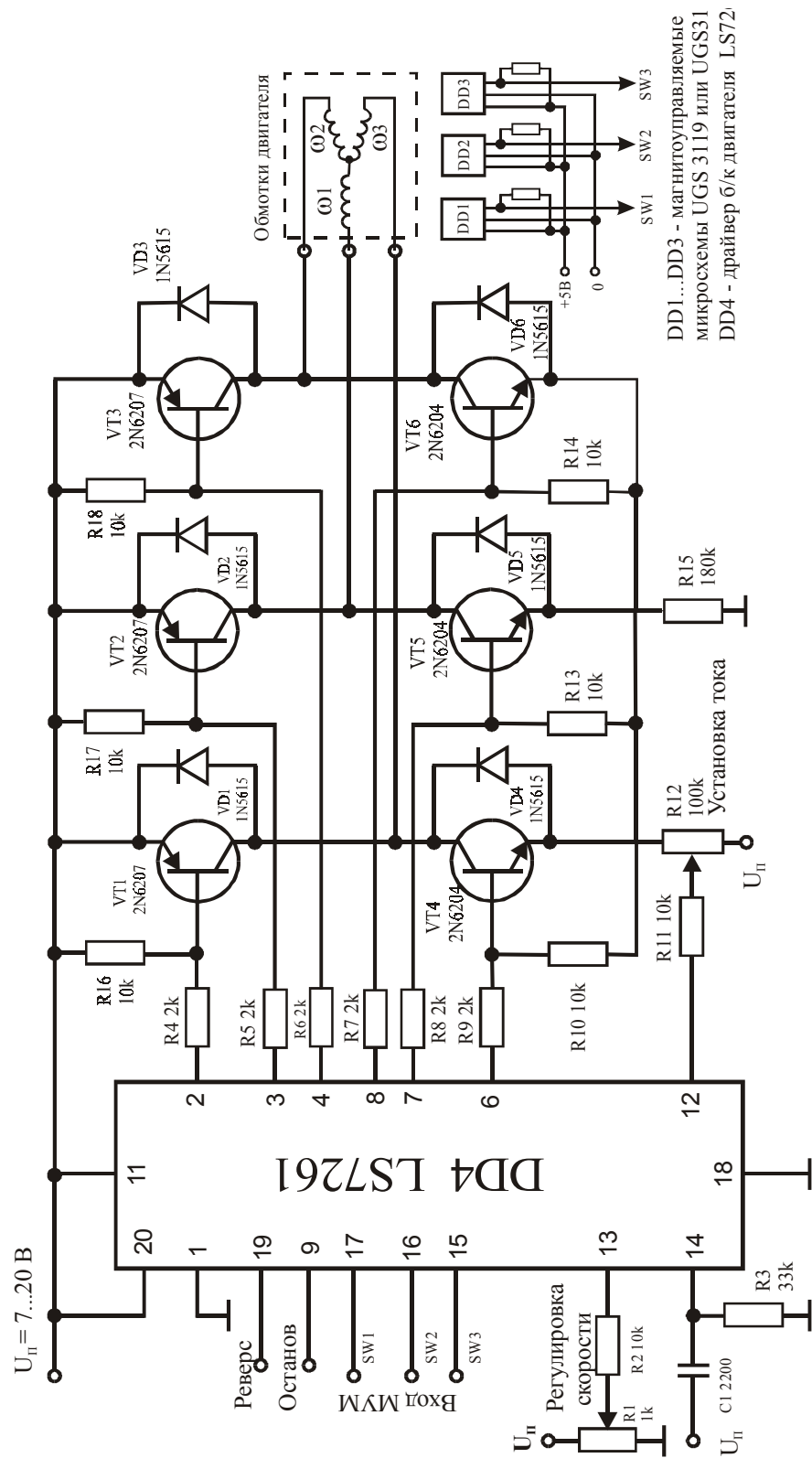


Рис. 5.120. Принципиальная схема трехфазного бесколлекторного электродвигателя постоянного тока с датчиками положения ротора на основе магнитоуправляемых ИС

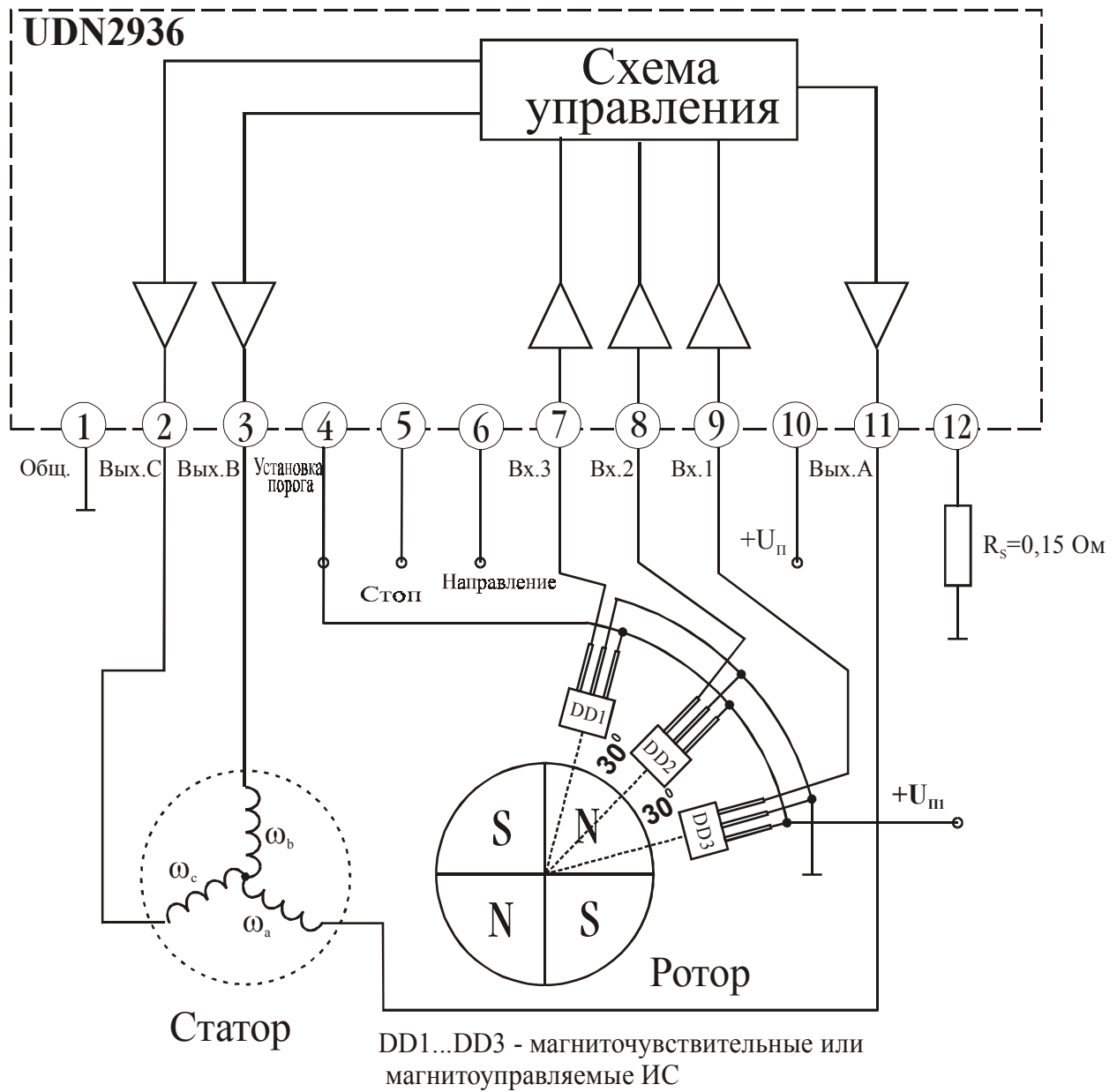


Рис. 5.121. Схема бесколлекторного трехфазного двигателя с использованием ИС драйвера типа UDN2936 и магнитоуправляемых ИС

5.8.3. Интегральные датчики положения ротора

Наиболее совершенными являются интегральные датчики положения ротора, выполненные в виде специализированных ИС, содержащих преобразователи магнитного поля и схемы непосредственного управления обмотками ЭД, объединенные в одном корпусе. Функциональные схемы таких ИС без подробных объяснений приводятся на рис. 5.122...5.124. Каждая из схем позволяет управлять только одной обмоткой электродвигателя. Следовательно, при проектировании двигателя количество ИС должно соответствовать количеству обмоток.

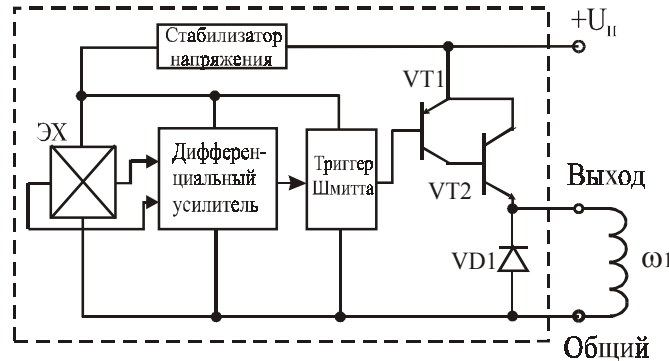


Рис. 5.122. Функциональная схема магнитоуправляемой ИС с мощным составным транзистором на выходе, предназначенной для непосредственного управления обмоткой вентильного электродвигателя

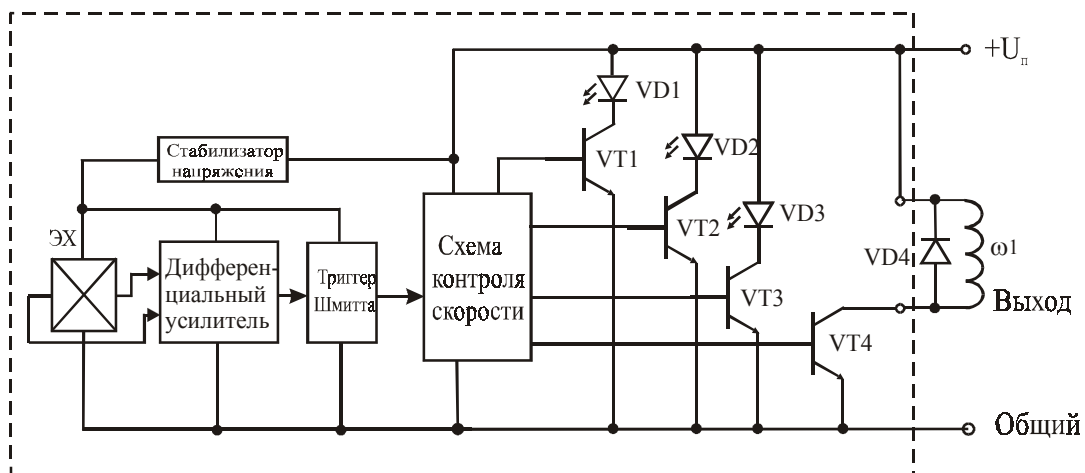


Рис. 5.123. Функциональная схема магнитоуправляемой ИС с мощным транзистором на выходе, предназначенной для непосредственного управления обмоткой вентильного электродвигателя

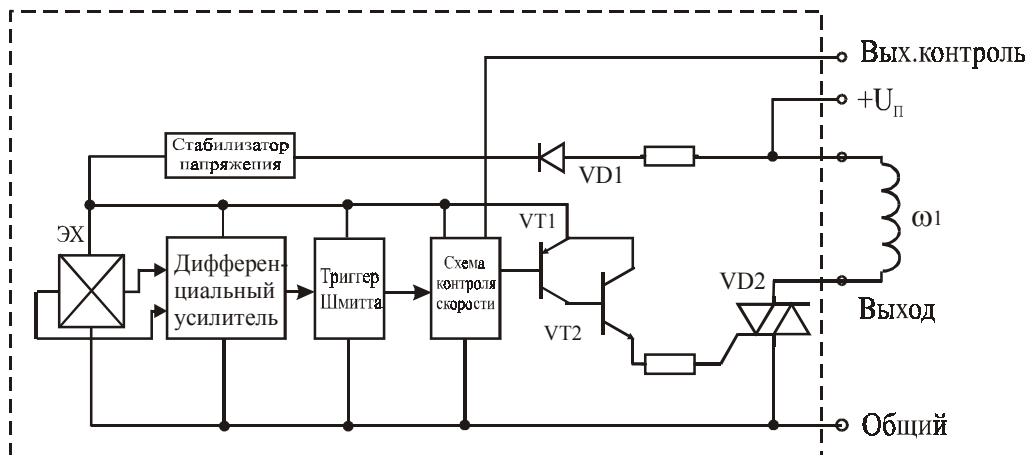


Рис. 5.124. Функциональная схема магнитоуправляемой ИС с тиристором на выходе, предназначенной для непосредственного управления обмоткой вентильного электродвигателя

В настоящее время рядом зарубежных фирм выпускаются магнитоуправляемые интегральные схемы, предназначенные для непосредственного управления обмотками двухфазных бесколлекторных электродвигателей.

Характерными представителями данного вида приборов являются интегральные микросхемы серий UDN 3625 и UGN5275, выпускаемые фирмами Sprague и Allegro.

Магнитоуправляемые микросхемы типа UDN 3625 и UDN 3626

Мощные МУМ типа UDN3625 и UDN3626 с током коммутации до 1,3А предназначены для непосредственного управления обмотками бесколлекторных электродвигателей постоянного тока. Упрощенная структурная схема МУМ с подключенными обмотками ЭД приведена на рис. 5.125.

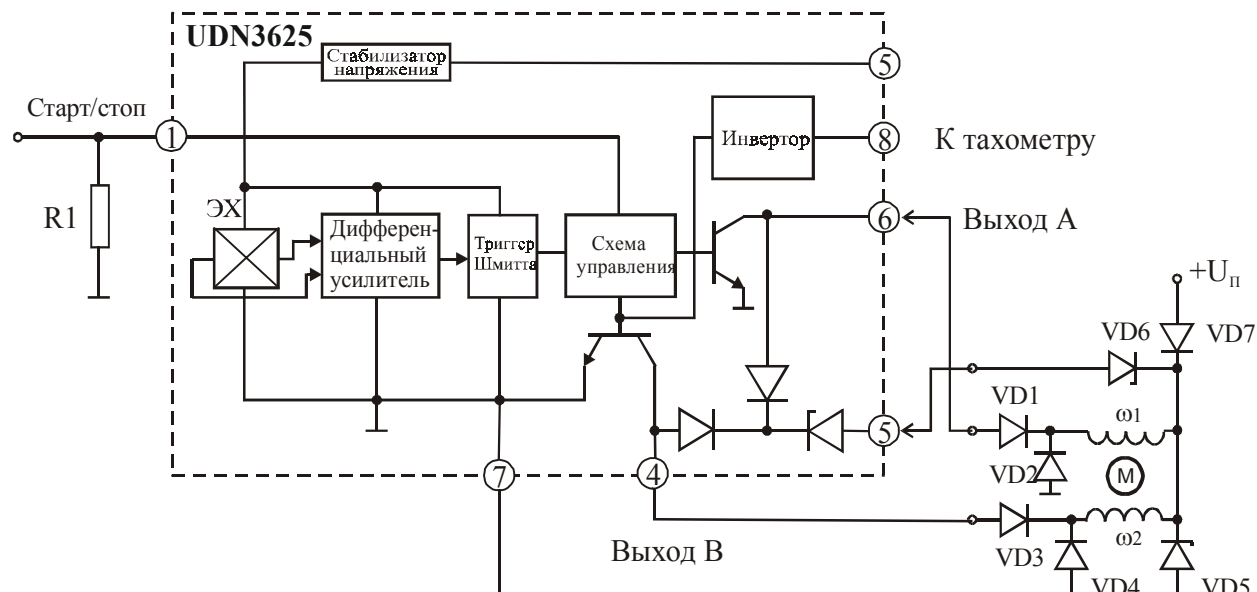


Рис. 5.125. Упрощенная функциональная схема МУМ типа UDN3625 (UDN3626). Диоды VD1...VD6 используются при больших токах коммутации

Функциональная схема (рис. 5.125) не требует особых пояснений. Особенностью схемы является наличие двух специальных выводов: вывода 1 для управления ЭД в режиме «старт/стоп» или аналогового управления скоростью вращения (при включении в замкнутую систему управления), а также вывода 8 для подключения тахометра.

В качестве источника управляющего магнитного поля используется ротор электродвигателя, выполненный в виде многополюсного магнита. Элемент Холла МУМ выполняет роль датчика положения ротора.

Схема работает следующим образом. Один из выходов (А) открывается при воздействии на ЭХ магнитного поля положительной полярности («южный» полюс магнита), другой (В) - открывается при воздействии магнитного поля отрицательной полярности («северный» полюс магнита).

Когда магниточувствительный элемент МУМ находится в области магнитного поля положительной полярности и при $B > B_{сраб}$, то на выходе А устанавливается уровень лог. «1», а на выходе В - уровень лог. «0».

Если магниточувствительный элемент МУМ находится в области магнитного поля отрицательной полярности и при $B > B_{сраб}$, то на выходе В устанавливается уровень лог. «1», а на выходе А - уровень лог. «0». Характеристика переключения МУМ приведена на рис. 5.126.

Микросхемы UDN3625 и UDN3626 отличаются только величиной рабочего напряжения тока коммутации. Основные параметры МУМ приведены в таблице 5.28. [43]

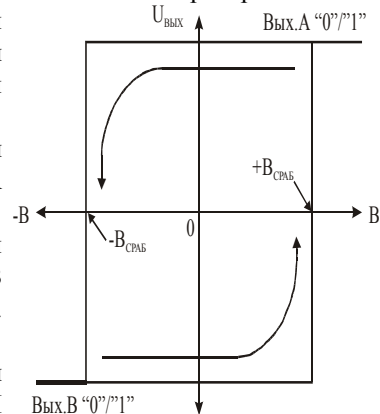


Рис. 5.126. Характеристика переключения МУМ типа UDN3625(UDN3626)

Таблица 5.28. Основные параметры МУМ типа UDN 3625 (UDN 3626)

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип микросхемы	
		UDN3625M	UDN3626M
1	Напряжение питания, В	от 6,5 до 14	от 24 до 26
2	Ток потребления, мА, не более	от 30 до 39 ($R1=\infty$) от 8 до 10 ($R1=0$)	24 ($R1=\infty$) от 8 до 10 ($R1=0$)
3	Ток коммутации, мА	от 900 до 1300	от 450 до 750
4	Индукция срабатывания/отпускания, мТл	$\pm(10...15)$	$\pm(10...15)$
5	Гистерезис, мТл	20	20
6	Время переключения, мкс	5	5
7	Диапазон рабочих температур, °С	-20...+85	-20...+85
8	Габаритные размеры, мм	7,1 x 10,2 x 5	7,1 x 10,2 x 5

Магнитоуправляемые микросхемы типа UGN5275

Магнитоуправляемые интегральные схемы UGN5275 предназначены для непосредственного управления обмотками бесколлекторных двигателей постоянного тока. Упрощенная функциональная схема МУМ приведена на рис. 5.127.

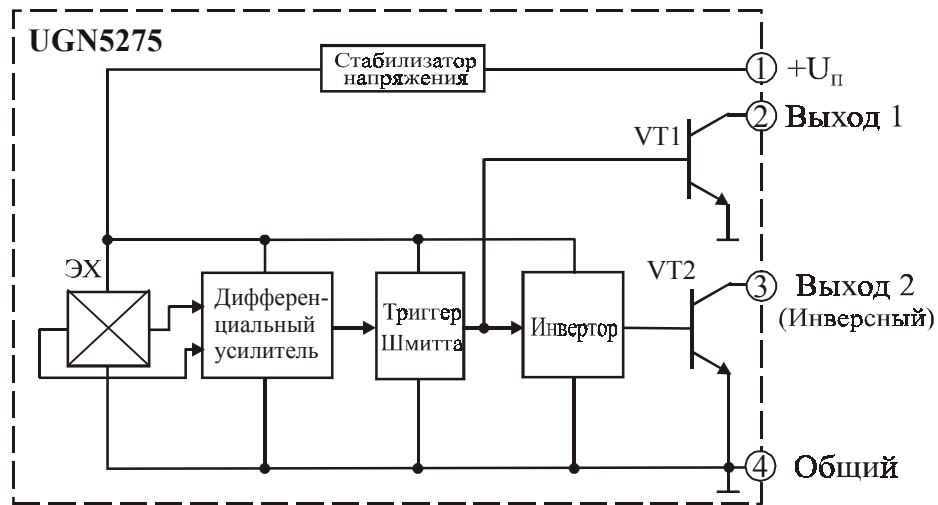


Рис. 5.127. Упрощенная функциональная схема МУМ типа UGN5275

Функциональная схема (рис. 5.127) не требует особых пояснений. Для стабилизации рабочих точек переключения прибор снабжен схемой термостабилизации. В качестве источника управляющего магнитного поля используется ротор электродвигателя, выполненный в виде многополюсного магнита. Элемент Холла МУМ выполняет роль датчика положения ротора.

Схема работает следующим образом. Один из выходов (Q1) открывается при воздействии на ЭХ магнитного поля положительной полярности («южный» полюс магнита), другой (Q2) - открывается при воздействии магнитного поля отрицательной полярности («северный» полюс магнита).

Когда магниточувствительный элемент МУМ находится в области магнитного поля положительной полярности при $B > B_{\text{сраб}}$ то на выходе (1) устанавливается уровень лог. «1», а выход Q2 остается в неизменном состоянии. При $B < B_{\text{отп}}$ выходе (1) устанавливается уровень лог. «0», а выход (2), по-прежнему, остается в неизменном состоянии. Аналогичным образом функционирует выход 2, но при воздействии магнитного поля отрицательной полярности. Характеристика переключения МУМ приведена на рис. 5.128. Основные параметры микросхем типа UGN5275 приведены в таблице 5.29. [31]

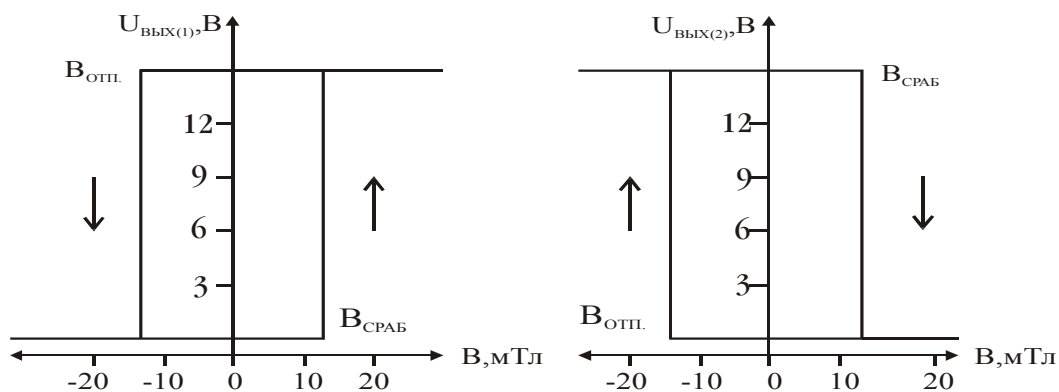


Рис. 5.128. Характеристика переключения МУМ типа UGN5275

На рис.5.129 приведены зависимости индукции срабатывания/отпускания МУМ от температуры.

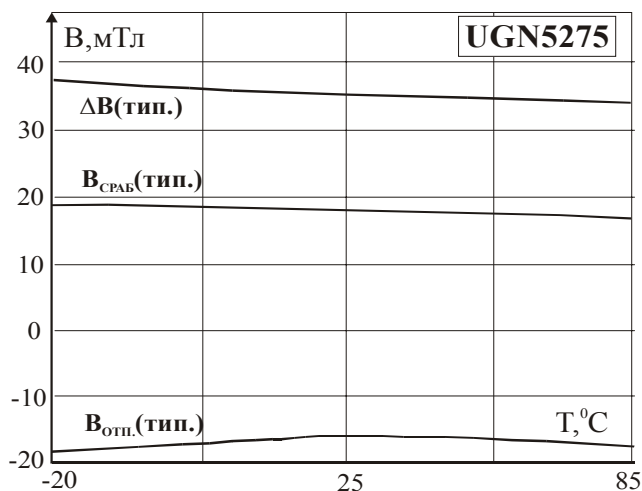
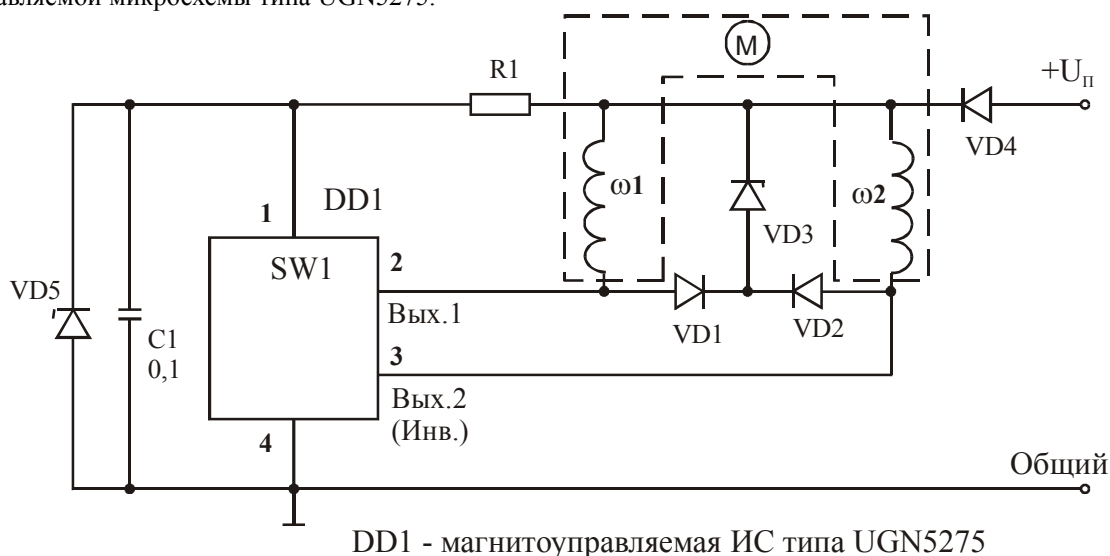


Рис. 5.129. Зависимости индукции срабатывания/отпускания МУМ типа UGN5275 от температуры

На рис. 5.130 приведена электрическая схема бесколлекторного электродвигателя с использованием магнитоуправляемой микросхемы типа UGN5275.



DD1 - магнитоуправляемая ИС типа UGN5275

Рис.5. 130. Электрическая схема бесколлекторного электродвигателя с использованием микросхемы типа UGN5275

Таблица 5.29. Основные параметры микросхем типа UGN5275

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Диапазон значений
1	Напряжение питания, В	от 4,5 до 14
2	Ток потребления, мА	от 18 до 30
3	Ток коммутации, мА	до 500
4	Напряжение коммутации, В	4,5...60
5	Индукция срабатывания, мТл	2,5...25
6	Индукция отпускания, мТл	-(25...2,5)
7	Гистерезис, мТл	10
8	Время переключения, мкс	1...3
9	Диапазон рабочих температур, °C	-20...+85
10	Габаритные размеры, мм	5,5 x 3,5 x 1,6

Основные параметры и характеристики наиболее известных и выпускаемых ведущими зарубежными фирмами типов МУМ для управления электродвигателями постоянного тока приводятся в главе 13 тома 2.

5.9. Схемы сопряжения магнитных датчиков с внешними цепями

В зависимости от используемой электронной «начинки», выход датчика может быть рассчитан на работу в двух основных режимах: «открытого коллектора» («Current-Soureing») или «открытого эмиттера» («Current-Sinking»). В зарубежной литературе принята определенная классификация датчиков по типу выхода, которая приведена на рис. 5.131.

Тип выхода	Обозначение
Sinking (NPN) Нормально разомкнутый	Sink. (NPN) NO
Sinking (NPN) Нормально замкнутый	Sink. (NPN) NC
Sinking (NPN) Нормально замкнутый Нормально разомкнутый	Sinking (NPN) NO NC
Sourcing (PNP) Нормально разомкнутый	Source (PNP) NO
Sourcing (PNP) Нормально замкнутый	Source (PNP) NC
Sourcing (PNP) Нормально разомкнутый Нормально замкнутый	Source (PNP) NO NC

Рис. 5.131. Зарубежная классификация электронных датчиков по типу выхода

Практически все типы магнитных датчиков имеют «стандартный» выход, и, следовательно, легко сопрягаются с другими элементами электронной техники.

На рис. 5.132...5.137 приведены без объяснений наиболее распространенные схемы сопряжения магнитных датчиков с внешними цепями и нагрузками, рекомендованные ведущим производителем - фирмой Honeywell.

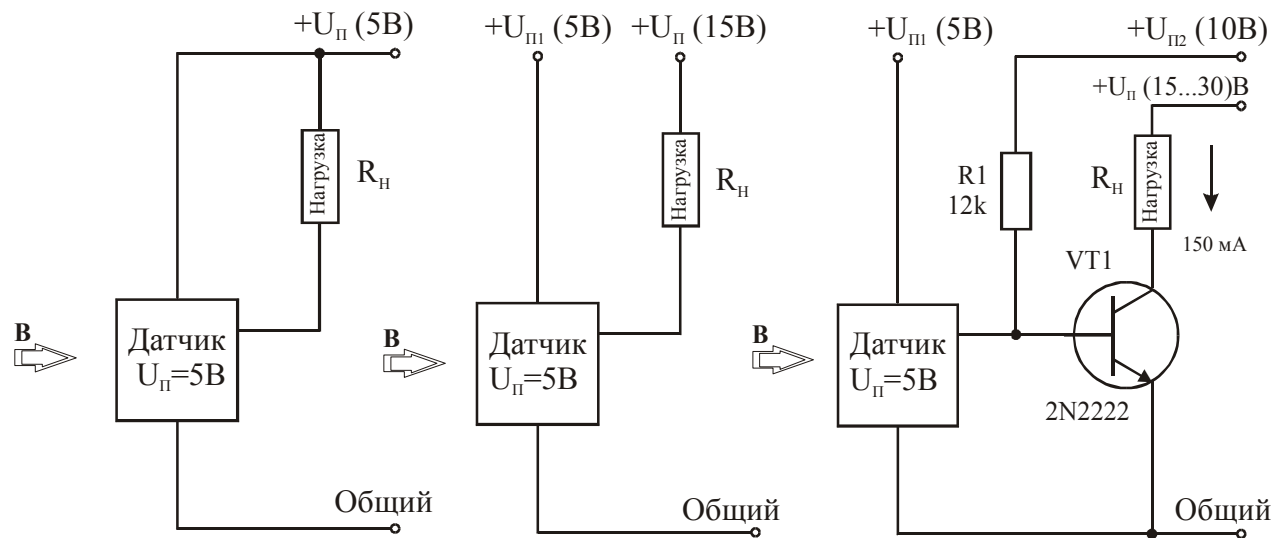


Рис. 5.132. Схемы сопряжения магнитных датчиков, работающих в режиме с «открытым коллектором», с внешними цепями

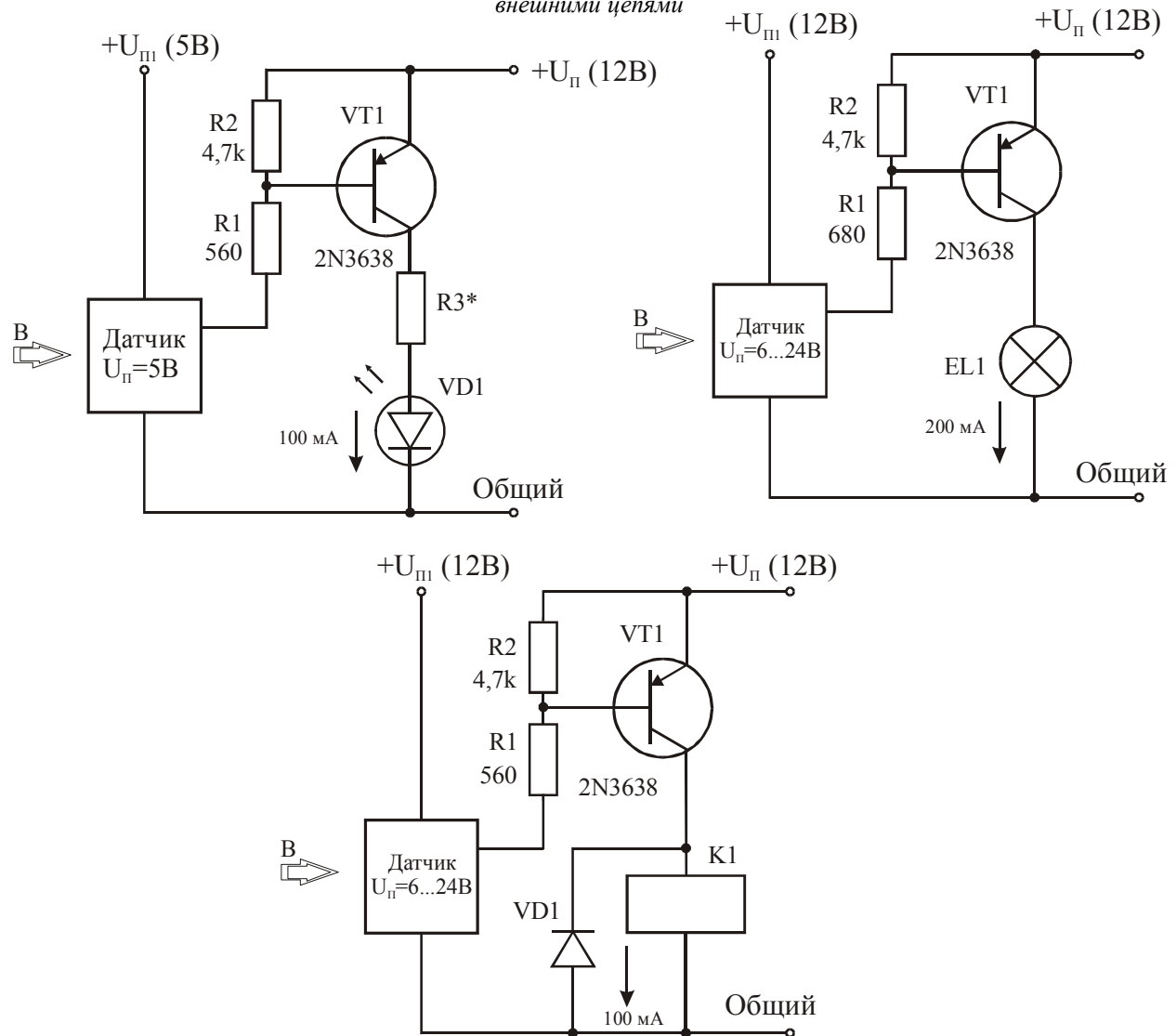


Рис. 5.133. Схемы сопряжения магнитных датчиков, работающих в режиме с «открытым коллектором», с внешними цепями

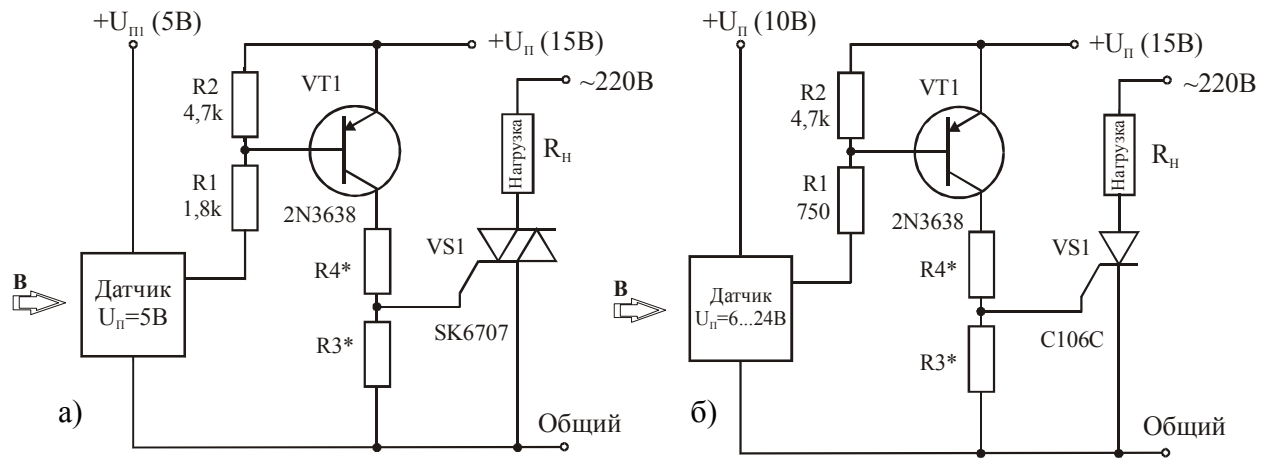


Рис. 5.134. Схемы сопряжения магнитных датчиков, работающих в режиме с «открытым коллектором»:
а – с симистором; б – с тиристором

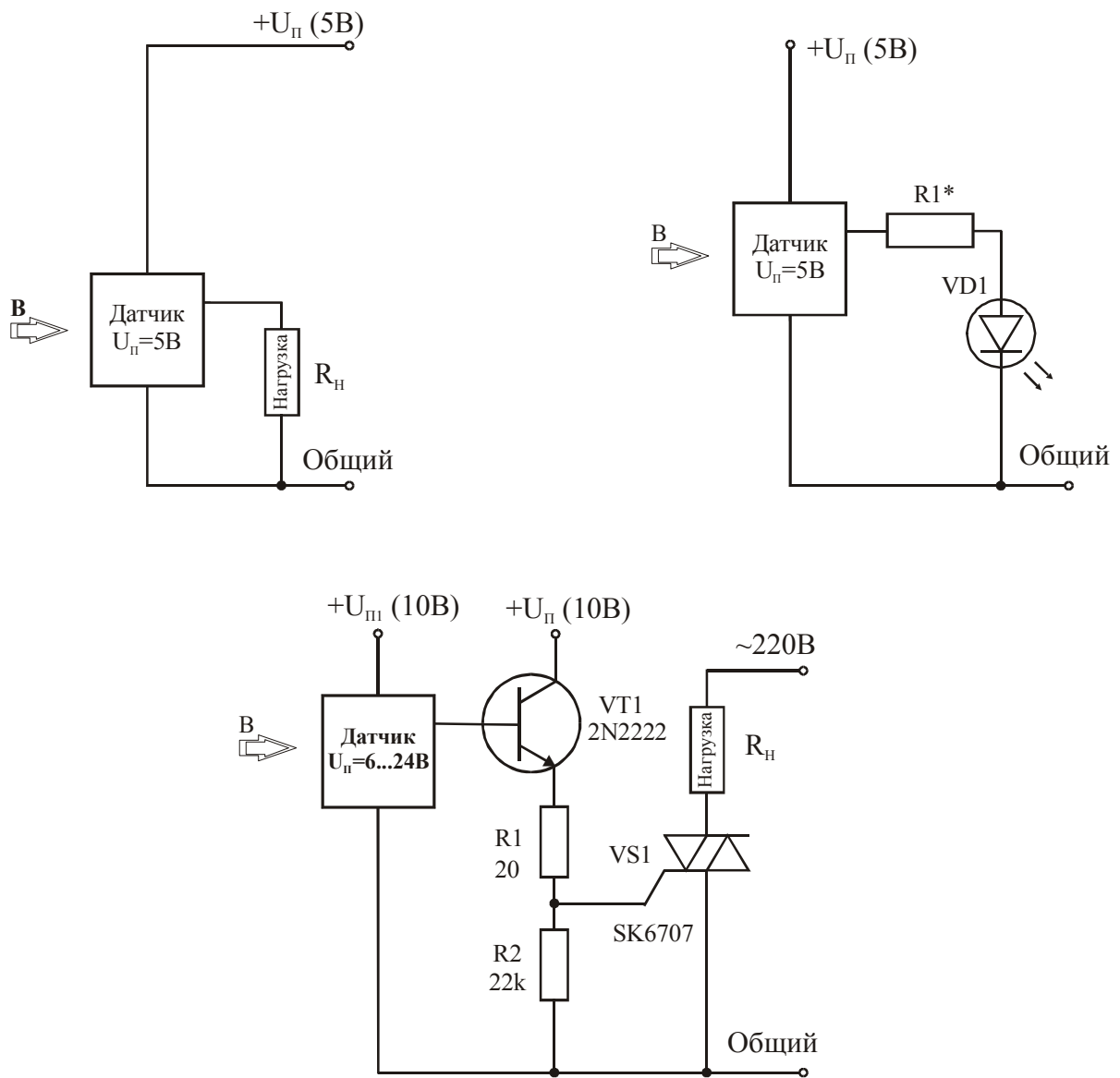


Рис. 5.135. Схемы сопряжения магнитных датчиков, работающих в режиме с «открытым эмиттером», с внешними цепями

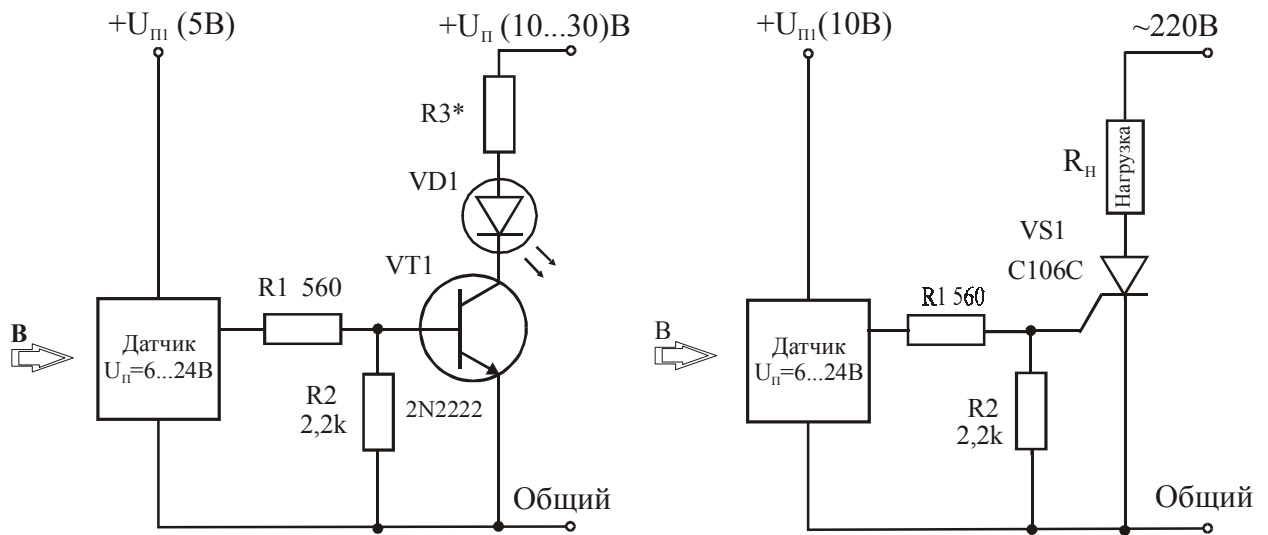


Рис. 5.136. Схемы сопряжения магнитных датчиков, работающих в режиме с «открытым эмиттером», с внешними цепями

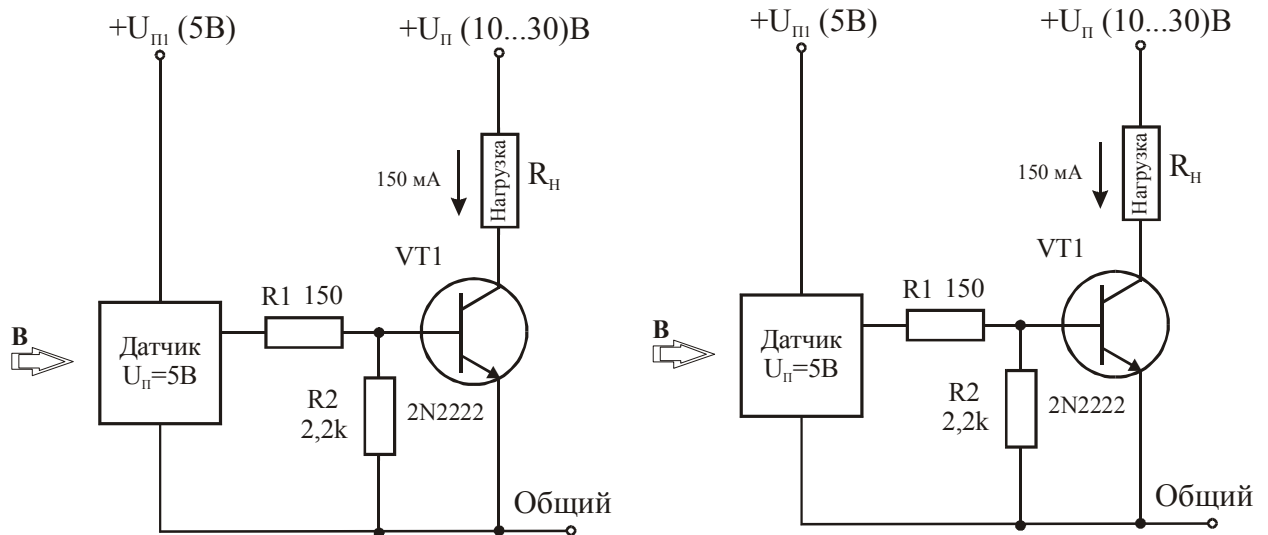


Рис. 5.137. Схемы сопряжения магнитных датчиков, работающих в режиме с «открытым эмиттером», с внешними цепями

5.10. Некоторые примеры применения ПМП и датчиков

Преобразователи магнитного поля находят широкое применение в составе функционально-ориентированных датчиков различного назначения. Ниже будут рассмотрены принципиальные схемы нескольких вариантов датчиков.

В настоящей главе не рассматриваются конкретные схемы усиления и обработки сигналов датчиков, схемы вторичных преобразователей и исполнительных устройств.

Информацию о таких схемах, устройствах, механизмах и блоках читатель может найти в специальной литературе

5.10.1. Примеры использования ПМП в составе функционально-ориентированных магнитных датчиков

Датчик контроля толщины ленты

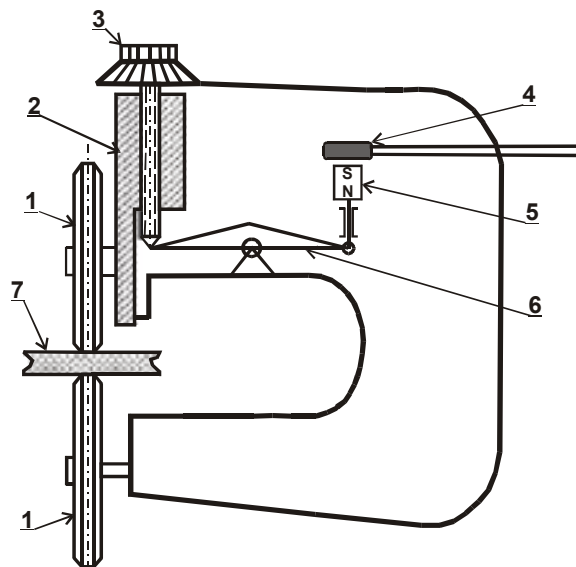


Рис. 5.138. Принципиальная схема датчика толщины ленты: 1 – ролик; 2 – подвижной сухарь; 3 – микрометрический винт; 4 – магниточувствительная ИС; 5 – постоянный магнит; 6 – рычаг; 7 – контролируемая лента

На рис. 5.138 приведена принципиальная схема датчика контроля толщины ленты.

Действие датчика основано на преобразовании изменения толщины ленты 7 в электрический сигнал, снимаемый с магниточувствительной микросхемы 4. Изменение толщины ленты воспринимается двумя роликами 1, один из которых укреплен на подвижном сухаре 2, опирающемся на микрометрический винт 3 на конце рычага 6. Второй конец рычага соединен с подвижным постоянным магнитом 5. Перемещение магнита 5 вызывает изменение сигнала на выходе магниточувствительной микросхемы 4. Установка нулевого положения осуществляется вращением микрометрического винта 3.

Датчики контроля размеров ферромагнитных изделий

На рис. 5.139 приведена упрощенная схема датчика контроля размеров ферромагнитных изделий. Действие датчика основано на преобразовании линейного перемещения контролируемой детали в электрический сигнал, снимаемый с выхода магниточувствительной микросхемы. Конструкция датчика позволяет измерять в контролируемой детали отклонения от номинального размера и выявлять некоторые дефекты на поверхности.

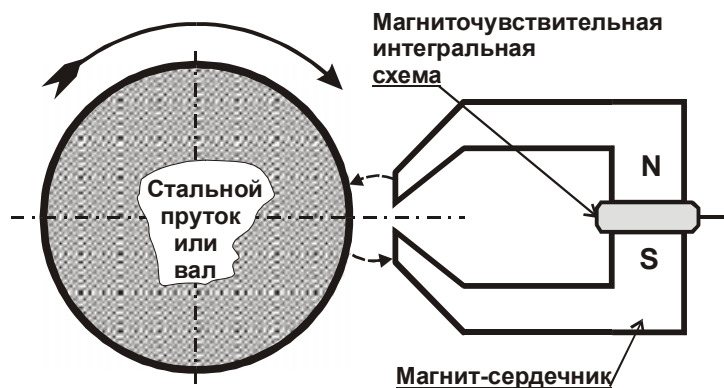


Рис. 5.139. Датчик контроля размеров ферромагнитных изделий

На рис. 5.140 дана упрощенная схема датчика контроля размеров ферромагнитных изделий, использующая компенсационный принцип измерений. Датчик содержит специальную обмотку (электромагнит), создающую магнитное поле, направленное навстречу основному полю постоянного магнита. Электромагнит питается усиленным напряжением, снимаемым с выхода магниточувствительной ИС.

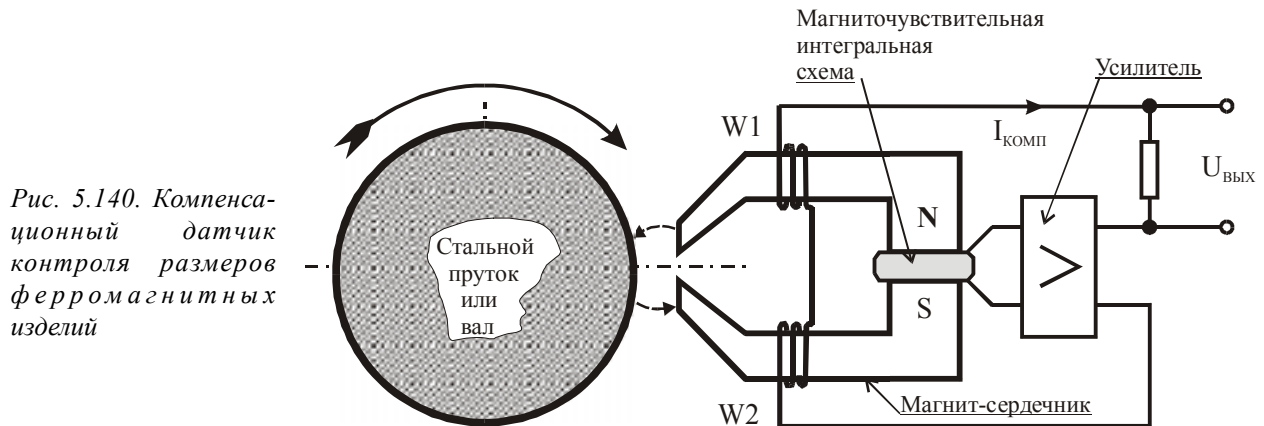


Рис. 5.140. Компенсационный датчик контроля размеров ферромагнитных изделий

При определенном коэффициенте передачи усилителя результирующий поток устанавливается равным нулю. Это означает, что напряженности поля от постоянного магнита и электромагнита в зазоре (месте установки МЧМС) будут равны.

При изменении расстояния между сердечником датчика и поверхностью контролируемой детали сила тока $I_{\text{КОМП}}$ в обмотке электромагнита будет изменяться пропорционально этому расстоянию.

Действие датчика аналогично работе схемы на рис. 5.139, но позволяет повысить точность и расширить диапазон измерений. Стабильность такой схемы очень высока и достигает 0,05–0,5%.

Датчик линейного перемещения

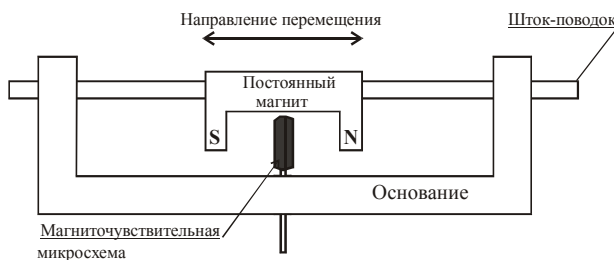


Рис. 5.141. Вариант конструкции датчика линейного перемещения.

На рис. 5.141 приведен вариант конструкции датчика линейного перемещения. Принцип действия датчика основан на изменении расстояния между полюсами «длинного» магнита при помощи штока-поводка, связанного с объектом контроля. В зависимости от предела измерений в качестве преобразователя магнитного поля может использоваться магнитоуправляемая интегральная схема или тонкопленочный магниторезисторный мост.

Датчик уровня жидкости

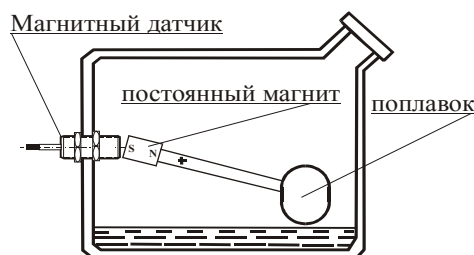
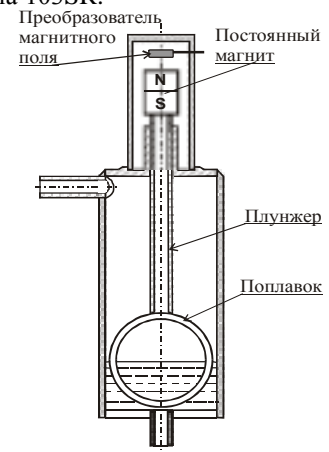


Рис. 5.142. Схема простейшего датчика уровня жидкости

На рис. 5.142 приведена схема простейшего датчика уровня жидкости. Действие такого датчика основано на регистрации перемещения поплавка, на конце которого закреплен постоянный магнит. В качестве регистрирующего элемента можно использовать аналоговый или цифровой датчик перемещения. В данном варианте используется магнитный датчик конечного положения типа 103SR.



Погружаемый датчик уровня жидкости

На рис. 5.143 дан еще один вариант конструкции датчика уровня жидкости. Действие этого датчика основано на использовании поплавка постоянного погружения. Перемещение поплавка передается плунжеру, на конце которого закреплен постоянный магнит. В качестве преобразователя магнитного поля можно использовать магниточувствительную или магнитоуправляемую интегральную схему. Перемещение постоянного магнита вызывает появление (изменение) сигнала на выходе преобразователя магнитного поля.

Рис. 5.143. Погружаемый датчик уровня жидкости

Гидростатический датчик уровня жидкости

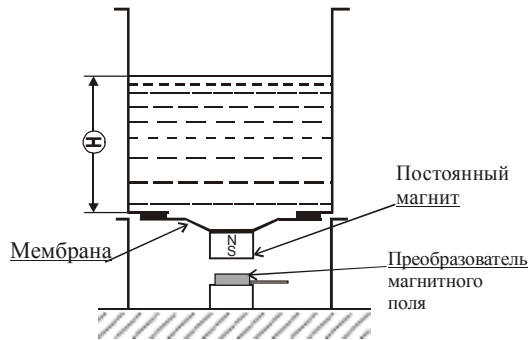


Рис. 5.144. Принципиальная схема гидростатического датчика уровня

На рис. 5.144 приведена принципиальная схема гидростатического датчика уровня. Действие датчика основано на измерении веса столба жидкости H , воздействующего на гибкую мембрану, встроенную в дно датчика. На мембране закрепляется постоянный магнит, перемещение которого (вместе с мембраной) фиксируется преобразователем магнитного поля. В качестве преобразователя магнитного поля может использоваться магниточувствительная ИС или магниторезисторный мост. Датчики уровня аналогичной конструкции наиболее пригодны для измерения уровня вязких жидкостей

Колокольный датчик уровня жидкости

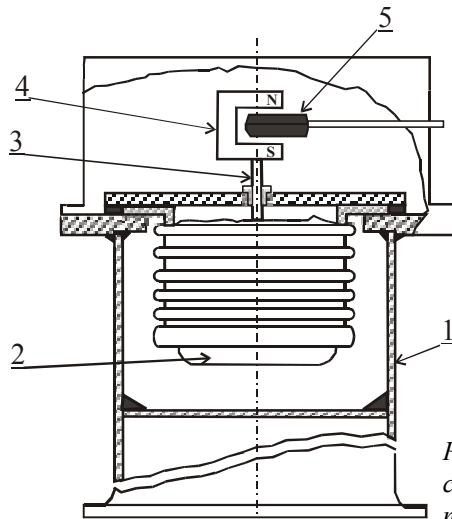


Рис. 5.145. Колокольный датчик уровня жидкости: 1 – колокол; 2 – сильфон; 3 – стержень-поводок; 4 – постоянный магнит; 5 – преобразователь магнитного поля

На рис. 5.145 рассмотрен вариант конструкции колокольного датчика уровня жидкости. Действие датчика уровня основано на зависимости давления воздуха внутри колокола 1, погруженного в жидкость, от изменения ее уровня. Изменение давления воспринимается сильфоном 2. Сильфон перемещает стержень-поводок 3, на конце которого закреплен постоянный магнит. Перемещение постоянного магнита регистрируется преобразователем магнитного поля 4. В зависимости от назначения датчика в качестве ПМП может использоваться магнитоуправляемая или магниточувствительная интегральная схема.

Многопредельный датчик уровня жидкости

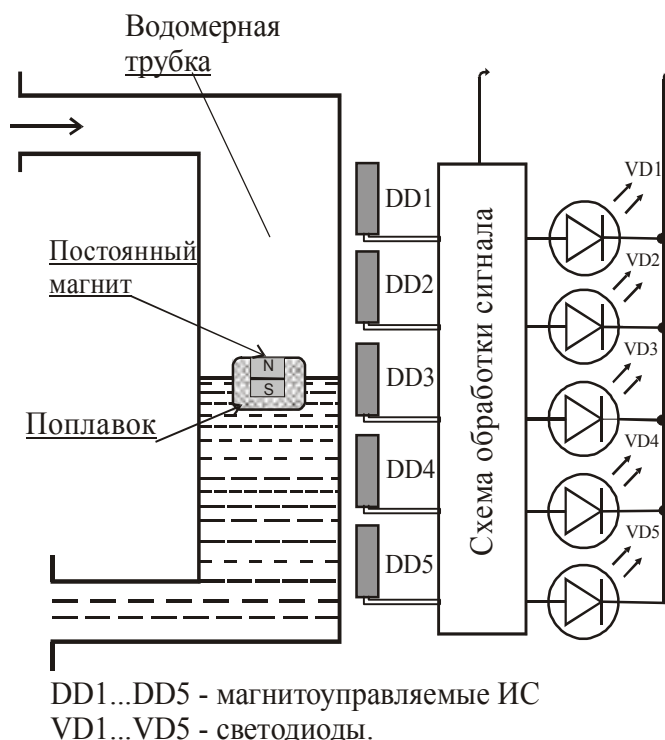


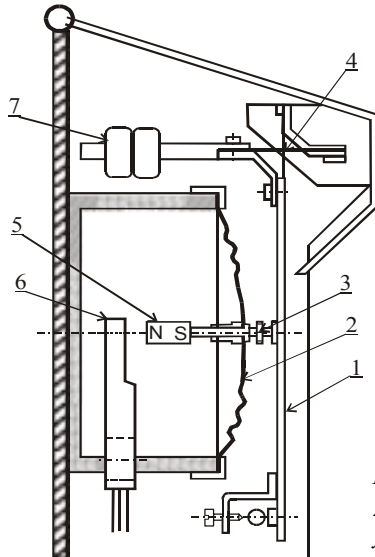
Рис. 5.146. Принципиальная схема многопредельного датчика уровня жидкости

На рис. 5.146 приведена принципиальная схема многопредельного датчика уровня жидкости. Схема не требует особых пояснений. В трубке уровнемера размещается поплавок, в который вмонтирован миниатюрный постоянный магнит. На наружной поверхности трубки находится несколько преобразователей магнитного поля. В зависимости от конкретных условий контроля в качестве ПМП могут использоваться магнитоуправляемые или магниточувствительные интегральные схемы.

Количество пределов измерений (диапазонов) определяется количеством ПМП. Для получения дискретного сигнала на выходе датчика используются МУМ, а для получения аналогового сигнала – МЧМС.

Трубка уровнемера изготавливается из немагнитного материала. Точность поплавковых датчиков определяется постоянством характеристик его элементов. Изменение характеристик элементов, создающих противодействующее усилие (например постоянного магнита), приводит к увеличению погрешности.

Датчик уровня сыпучих материалов



На рис. 5.147 приведена схема датчика уровня сыпучих материалов. Действие датчика основано на измерении давления контролируемого материала на подвижную заслонку 1, установленную вертикально в стенке бункера или вагона.

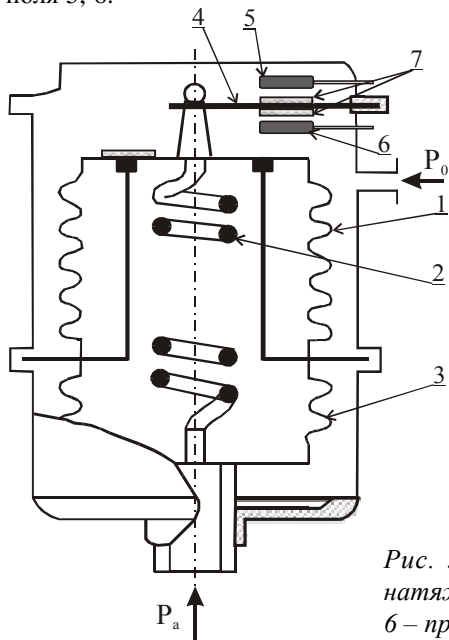
Заслонка 1 подвешена на крестообразном пружинном шарнире 4. При заполнении емкости масса контролируемого материала воздействует через заслонку 1 на толкатель 3, на котором укреплен постоянный магнит 5. Перемещение магнита регистрируется магнитным датчиком 6. Превышение давления сверх установленной нормы вызывает срабатывание датчика 6.

В качестве датчика перемещения 6 можно использовать SR7P фирмы Honeywell или аналогичный.

Рис. 5.147. Датчик уровня сыпучих материалов: 1 – подвижная заслонка; 2 – мембрана; 3 – толкатель; 4 – крестообразная пружина; 5 – постоянный магнит; 6 – датчик типа перемещения типа SR7P; 7 – балансир

Датчик абсолютного давления

На рис. 5.148 приведена схема датчика абсолютного давления. Действие датчика основано на преобразовании давления, воспринимаемого сильфоном, в электрический сигнал преобразователей магнитного поля 5, 6.



Измеряемое абсолютное давление p_a газа подается на внутренние полости рабочего 1 и разделительного 3 сильфонов. Опорный вакуум p_0 подается во внешнюю полость рабочего сильфона.

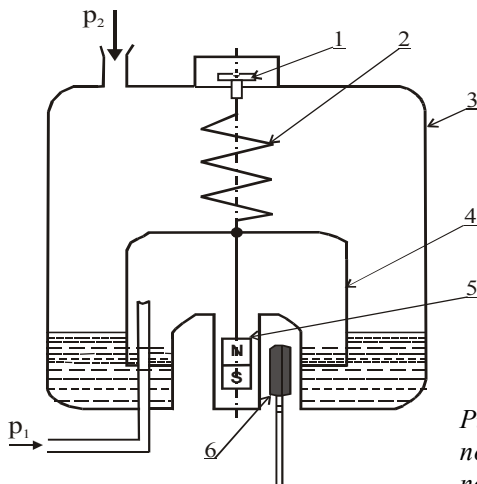
Датчик измеряет разность давлений:

$$P_{\partial} = P_a + P_0 + P_{\Phi} \quad (5.25)$$

Фиксированное давление p_{Φ} создается натяжением пружины 2, с помощью которой производят предварительное сжатие сильфона и изменение диапазона измерения. При перемещении центра сильфона изгибается плоская пружина 4, на которой закреплены постоянные магниты 7. Перемещение (изгиб) пружины 4 фиксируется преобразователями магнитного поля 5, 6. В зависимости от диапазона измерений в качестве ПМП могут использоваться магниточувствительные микросхемы или магниторезисторные мостовые датчики.

Рис. 5.148. Датчик абсолютного давления: 1 – рабочий сильфон; 2 – натяжная пружина; 3 – разделительный сильфон; 4 – плоская пружина; 5, 6 – преобразователи магнитного поля; 7 – постоянные магниты

Датчик разности давлений



На рис. 5.149 приведен вариант конструкции датчика разности давлений. Действие датчика основано на использовании колокольной жидкостной системы. Перемещение колокола 4, подвешенного на пружине 2, под действием разности давлений передается постоянному магниту 5 и регистрируется магниточувствительной микросхемой 6. Винт 1 служит для установки нулевого положения. Изменение пределов измерений производится сменой пружины 2.

Рабочее положение датчика – горизонтальное, его используют при отсутствии вибрации и тряски. Датчик подобной конструкции может использоваться для регулирования разности давлений, расхода (с диафрагмой), напора или тяги неагрессивных газов.

Рис. 5.149. Датчик разности давлений: 1 – винт установки нулевого положения; 2 – пружина; 3 – корпус датчика; 4 – колокол; 5 – постоянный магнит; 6 – магниточувствительная микросхема.

Миниатюрный датчик давления

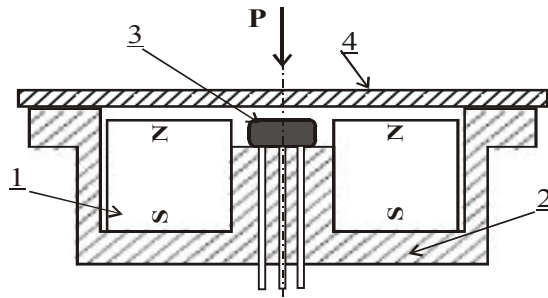


Рис. 5.150. Вариант конструкции миниатюрного датчика давления: 1 – кольцевой постоянный магнит; 2 – корпус-магнитопровод; 3 – преобразователь магнитного поля; 4 – стальная мембрана

Действие датчика давления (рис. 5.150) основано на преобразовании прогиба мембраны 4 под действием внешнего давления в электрический сигнал.

Изменение давления приводит к изгибу тонкой плоской мембраны 4 и соответственно к изменению индукции магнитного поля в зазоре между преобразователем магнитного поля 3 и сердечником магнитопровода 2. Изменение индукции вызывает изменение сигнала на выходе преобразователя 3. В качестве преобразователя магнитного поля может использоваться высокочувствительная МЧМС или тонкопленочный магниторезисторный мост.

Если вместо стальной мембраны 4 использовать майларовую мембрану с ферритовым покрытием, то датчик давления превращается в микрофон.

Датчики давления газа

На рис. 5.151. приведены два варианта конструкций датчиков давления. Действие датчиков давления основано на регистрации перемещения гибкой мембраны, вызванной изменением давления P .

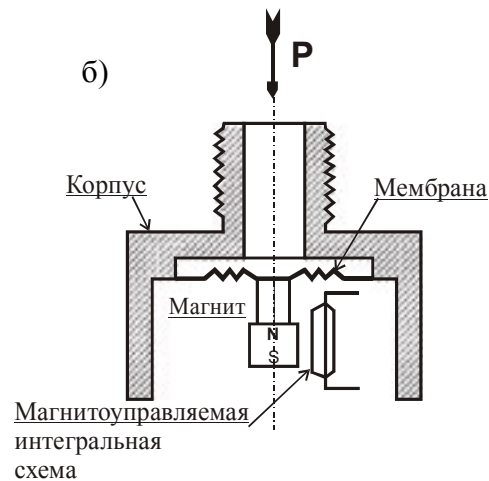
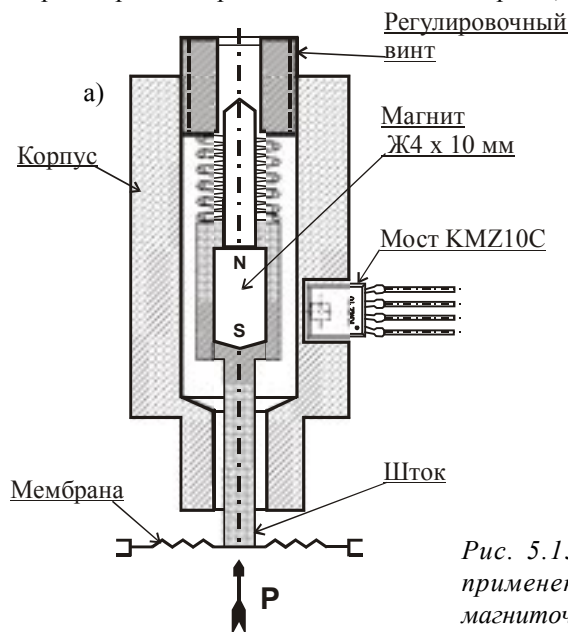
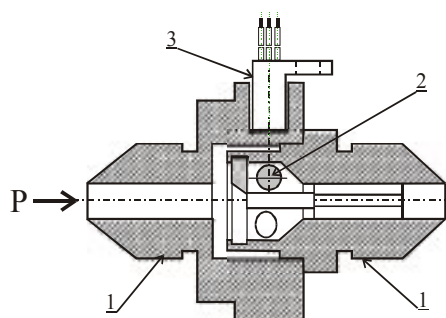


Рис. 5.151. Варианты конструкций датчиков давления: а – с применением магниторезисторного моста; б – с применением магниточувствительной ИС

В первом случае (рис. 5.151.а) перемещение (изгиб) мембраны вызывает перемещение штока с встроенным в него постоянным магнитом. Изменение положения магнита регистрируется магниторезисторным мостом.

Во втором случае (рис. 5.151.б) постоянный магнит укреплен непосредственно на мембране и ее перемещение регистрируется магниточувствительной ИС.

Шариковый датчик расхода жидкости

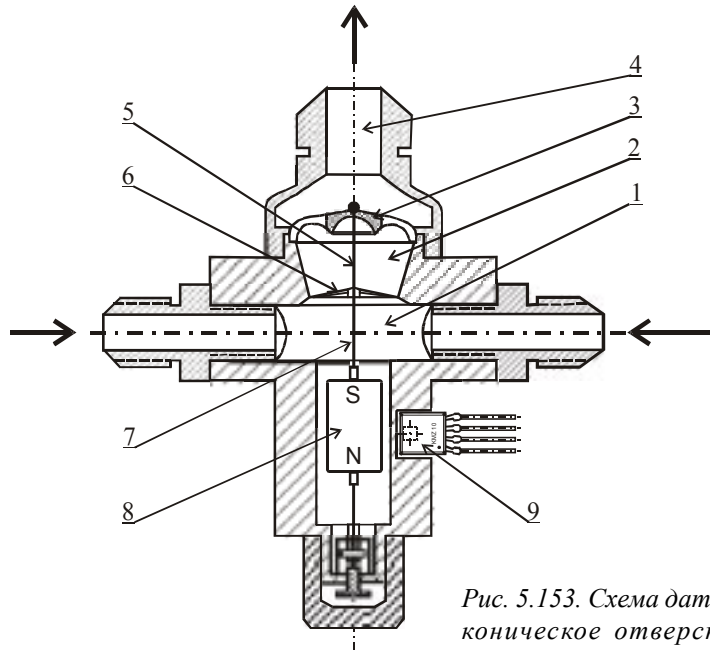


На рис. 5.152 приведен вариант конструкции шарикового датчика расхода жидкости, который является разновидностью турбинного датчика. В нем роль вращающегося элемента играет шарик 2 из ферромагнитного материала, помещенный в цилиндрическую камеру. Поток жидкости, подводимый к камере, закручивается, проходя через тангенциальные отверстия или через неподвижную винтовую крыльчатку. Шарик 2 вращается по внутренней поверхности камеры со скоростью, пропорциональной расходу. Вращение шарика регистрируется магнитным датчиком 3, в качестве которого может использоваться МД типа GT01GA (фирмы Honeywell) или его более чувствительный аналог. Корпус датчика 1 тонкостенный, изготовлен из немагнитного материала.

Рис. 5.152. Вариант конструкции шарикового датчика расхода: 1 – корпус датчика; 2 – шарик из ферромагнитного материала; 3 – магнитный датчик

Характеристика такого датчика (рис. 5.152) близка к линейной (наилучшее приближение наблюдается при равенстве объемного веса шарика с удельным весом контролируемой жидкости). Преимуществом шарикового датчика является простота конструкции, недостатками – большая потеря давления, износ шарика и необходимость применения высокочувствительного МД. Датчик подобной конструкции может быть использован для измерения малых расходов (менее $1 \text{ см}^3/\text{с}$) агрессивных жидкостей. Точность измерения составляет $\pm (1-1,5\%)$ [56].

Датчик малых расходов жидкости



На рис. 5.153 приведена схема датчика малых расходов жидкости. Действие датчика основано на том, что расход жидкости влияет на изменение положения поплавка, расположенного в потоке. Жидкость поступает в камеру 1 и, протекая снизу вверх через коническое отверстие 2 и проходное сечение опорной платы 3, выходит через штуцер 4. По оси конического отверстия натянута металлическая нить 5, по которой свободно перемещается трубка 7 с поплавком 6 и постоянным магнитом 8.

Высота подъема поплавка, а следовательно, и перемещение постоянного магнита 8 пропорциональны измеряемому расходу. Перемещение магнита 8 регистрируется магниторезисторным мостом 9 (KMZ10A).

Рис. 5.153. Схема датчика малых расходов жидкости: 1 – камера; 2 – коническое отверстие; 3 – опорная плата; 4 – штуцер; 5 – металлическая нить; 6 – поплавок; 7 – трубка; 8 – постоянный магнит; 9 – магниторезисторный мост типа KMZ10A

Лопастной датчик расхода жидкости

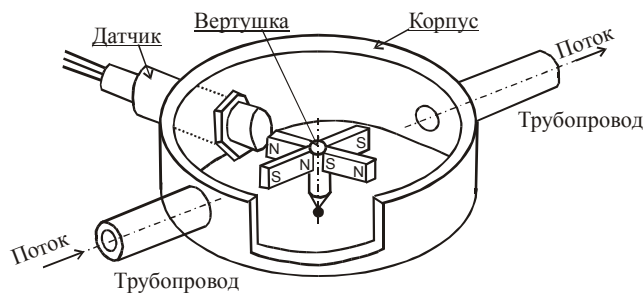
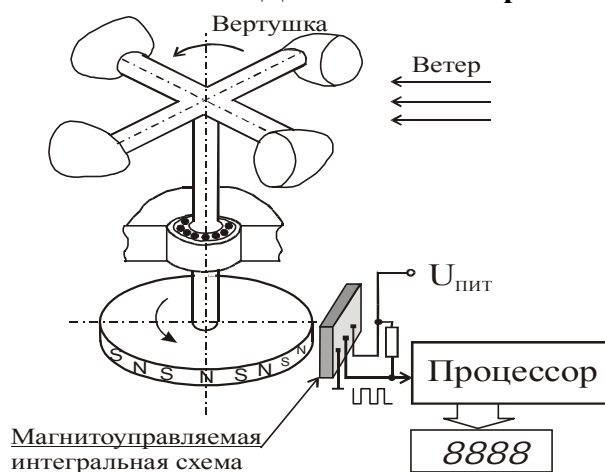


Рис. 5.154. Вариант конструкции лопастного датчика расхода жидкости

На рис. 5.154 показан вариант конструкции лопастного или турбинного датчика расхода жидкости. В герметичном корпусе из немагнитного материала на специальных опорах вращается 4-лопастная турбинка с размещенными на лопастях микромагнитами. Скорость вращения турбинки определяется магнитным датчиком, встроенным в корпус прибора. Выходной сигнал датчика подается на счетчик импульсов, откалиброванный в единицах расхода. В качестве датчика скорости вращения турбинки, например, может использоваться серия МД 103SR (фирмы Honeywell) или ее аналоги.

Датчик для измерения скорости ветра (анемометр)



На рис. 5.155 дан вариант конструкции анемометра. В датчике вращение вертушки прибора приводит к вращению многополюсного кольцевого магнита. Скорость вращения магнита измеряется при помощи магнитоуправляемой ИС, включенной на вход специального процессора, обрабатывающего сигнал. Результаты измерений регистрируются ЖКИ в принятых единицах измерения (например в метрах в секунду).

Рис. 5.155. Вариант конструкции анемометра

Датчик амплитуды вибраций

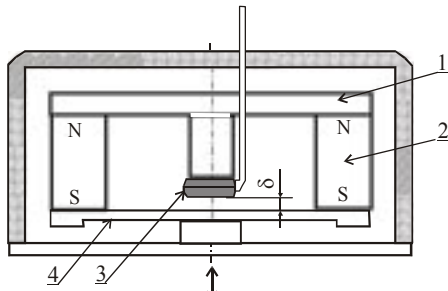


Рис. 5.156. Схема датчика амплитуды вибраций: 1 – магнитопровод; 2 – кольцевой постоянный магнит; 3 – преобразователь магнитного поля; 4 – стальная мембрана; δ – зазор

На рис. 5.156 приведена схема датчика амплитуды вибраций. Работа датчика основана на преобразовании силы, влияющей на инерционную массу, подвергающуюся воздействию вибрационных ускорений, в изменение длины и, следовательно, магнитной проводимости зазора δ .

Инерционной массой является магнитная система, состоящая из магнитопровода 1 с постоянным магнитом 2 и преобразователем магнитного поля 3. Эти элементы укрепляются на мембране 4. При изменении магнитной проводимости зазора δ на выходе преобразователя магнитного поля 3 возникает сигнал, частота которого равна частоте следования вибрационных ускорений.

В качестве преобразователя магнитного поля 3 может использоваться магниточувствительная микросхема или тонкопленочный магниторезисторный мост.

Бесконтактный манипулятор типа «джойстик»

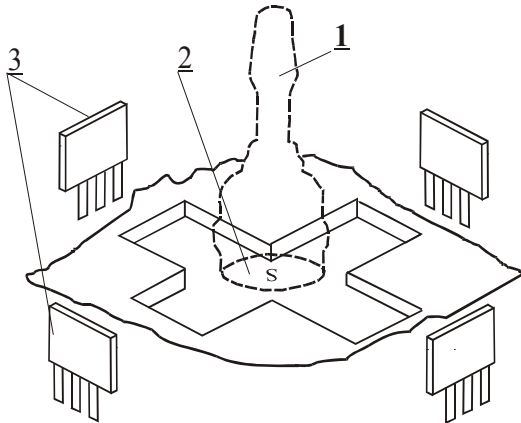


Рис. 5.157. Вариант конструкции манипулятора типа «джойстик»: 1 – рукоятка; 2 – постоянный магнит; 3 – преобразователь магнитного поля

На рис. 5.157 приведен вариант конструкции бесконтактного манипулятора типа «джойстик», который не требует специальных пояснений. Перемещение рукоятки 1 с постоянным магнитом 2 регистрируется преобразователями магнитного поля 3. В качестве преобразователей магнитного поля могут использоваться магнитоуправляемые и магниточувствительные интегральные схемы.

Магнитные датчики могут применяться и в манипуляторах типа «мышь». Например, замена открытых оптопар «светодиод–фоторезистор» (или «светодиод–фотодиод») на микроминиатюрные щелевые магнитные датчики позволяет не только снизить мощность, потребляемую манипулятором, но и значительно повысить его надежность, так как самым ненадежным элементом такого манипулятора является светодиод.

Датчик вибрационных перемещений

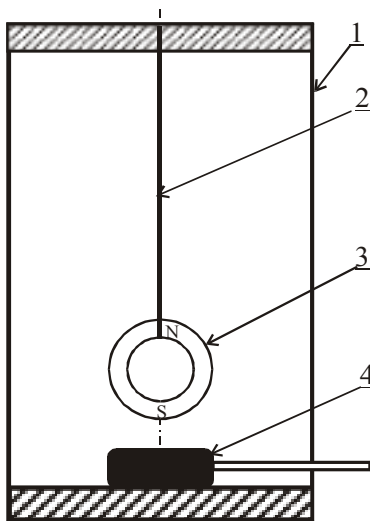


Рис. 5.158. Датчик вибрационных перемещений: 1 – корпус; 2 – «нитяной» подвес; 3 – кольцевой магнит; 4 – магнитоуправляемая ИС

На рис. 5.158 приведен вариант конструкции простейшего датчика вибрационных перемещений. Управляющим элементом датчика служит кольцевой магнит на «нитяном» подвесе. Датчик предназначен для использования в системах охранной сигнализации садовых участков. В начальном положении датчик устанавливается строго вертикально на легком ограждении участка. Любое перемещение датчика вызовет срабатывание магнитоуправляемой ИС.

21. Магнитный датчик наклона

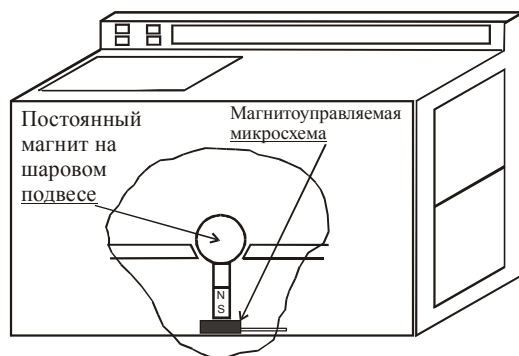


Рис. 5.159. Магнитный датчик наклона

На рис. 5.159 приведен вариант конструкции магнитного датчика наклона. Управляющим элементом датчика служит постоянный магнит, укрепленный на шаровом подвесе, а в качестве чувствительного элемента использована магнитоуправляемая интегральная микросхема. При повороте контролируемого объекта (например, холодильной камеры) магнит всегда будет стремиться занять строго вертикальное положение. Совпадение осей магнита и МУМ приводит к срабатыванию (или отпусканию) микросхемы.

При использовании в качестве ПМП магниточувствительной ИС данное устройство может быть использовано в качестве «электронного уровня».

Датчик наклона для автомобильной охранной сигнализации

На рис. 5.160 приведена конструкция и схема простейшего датчика наклона, предназначенная для автомобильной сигнализации.

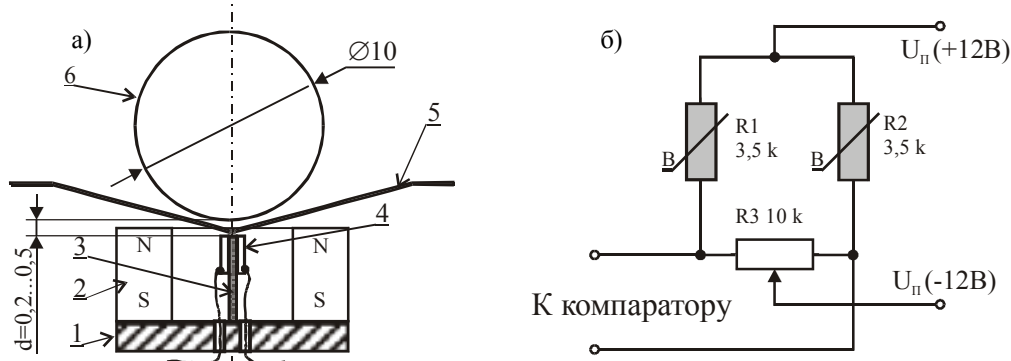


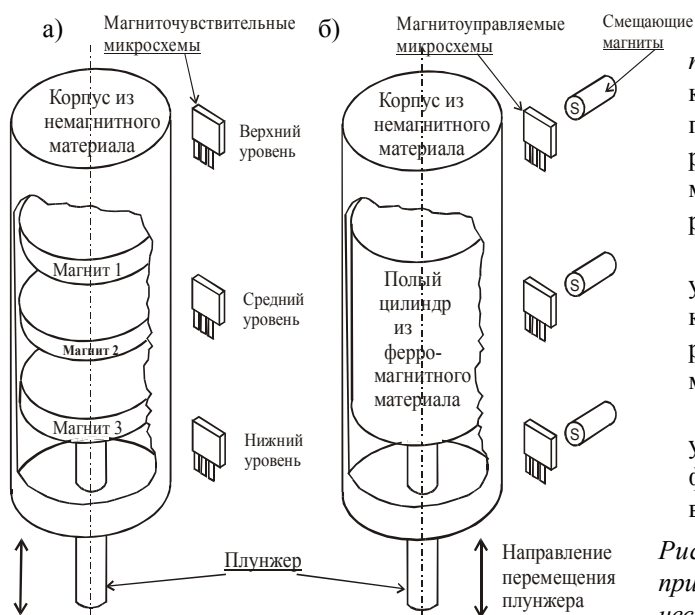
Рис. 5.160. Конструкция (а) и схема (б) датчика наклона: 1 - магнитопровод; 2 - кольцевой магнит; 3 - стойка; 4 - магнитореисторы; 5 - воронка; 6 - стальной шарик

На магнитопроводе 1 закреплен кольцевой магнит 2 (М2КА-1 типоразмера К12х6х4), а на стойке 3 укреплены два тонкопленочных магнитореистора типа Ав-2. Замыкателем магнитной системы служит стальной шарик 6, помещенный на дне воронки 5, изготовленной из немагнитного материала (латунь, медь, алюминий). Чувствительность датчика определяется величиной рабочего зазора d .

Магнитореисторы R1 и R2 вместе с подстроечным резистором R3 образуют схему моста (рис. 5.160.б).

Наклон или резкое перемещение датчика приводит к возникновению сигнала ($\sim 10...20$ мВ) на выходе моста, что приводит к срабатыванию системы охранной сигнализации автомобиля. [3]

Поршневые датчики перемещения



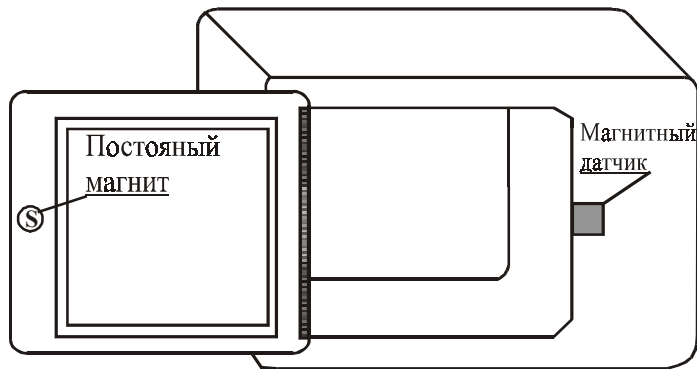
На рис. 5.161 даны два варианта конструкций поршневых датчиков перемещения. Усилие контролируемого объекта передается через плунжер управляющему элементу. Оба варианта размещены в цилиндрах из немагнитного материала и имеют аналогичную конструкцию, но различные управляющие элементы.

В первом варианте (рис. 5.161.а) в качестве управляющего элемента используется несколько кольцевых магнитов, перемещение которых регистрируется магниточувствительными или магнитоуправляемыми микросхемами.

Во втором варианте (рис. 5.161.б) в качестве управляющего элемента используется ферромагнитный стакан, перемещение которого вызывает срабатывание магнитоуправляемых ИС.

Рис. 5.161. Поршневые датчики перемещения с применением в качестве управляющих элементов: а – нескольких магнитов; б – ферромагнитного цилиндра

Датчик системы блокировки дверей



На рис. 5.162 приведен вариант применения магнитных датчиков для блокировки дверей (например, электрошкафов-распределителей) и систем охранной сигнализации. В этом случае на двери укрепляется постоянный магнит, а на дверной раме - цифровой магнитный датчик. Открывание дверей вызывает срабатывание датчика.

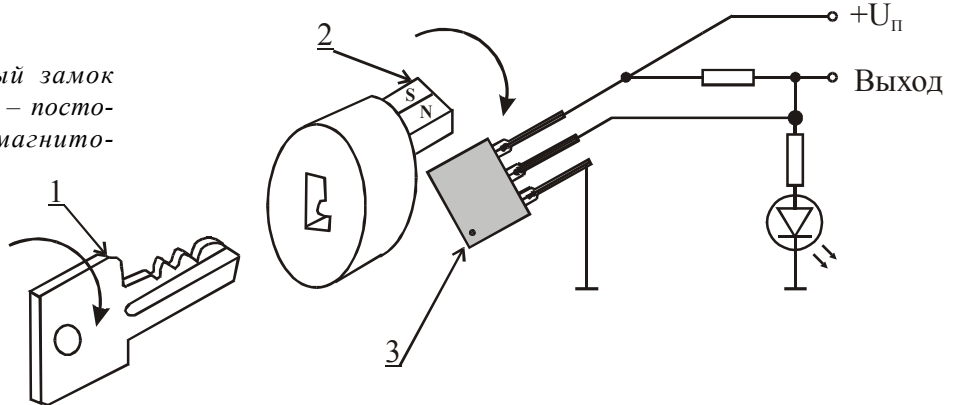
Рис. 5.162. Применение магнитного датчика для систем блокировки дверей и охранной сигнализации

Магнитный замок зажигания

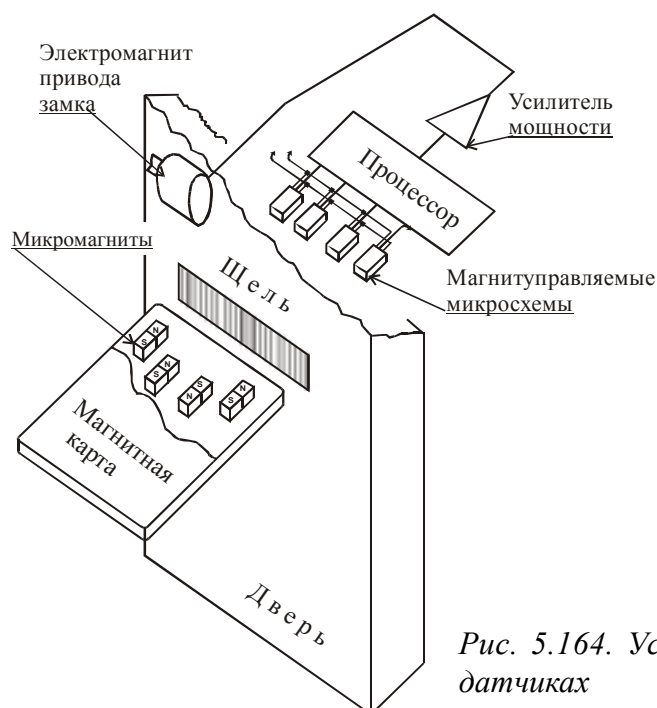
На рис. 5.163 приведена простейшая конструкция бесконтактного замка зажигания. Магнитоуправляемая схема 3 срабатывает при повороте магнита 2 при помощи ключа 1, что приводит к «отпираанию» электронной системы зажигания.

Бесконтактный магнитный замок обеспечивает безопасность, он нечувствителен к пыли, грязи и повышенной влажности.

Рис. 5.163. Магнитный замок зажигания: 1 – ключ; 2 – постоянный магнит; 3 – магнитоуправляемая ИС



Кодовый замок на магнитных датчиках



На рис. 5.164 показано упрощенное устройство кодового замка. «Ключом» такого замка служит магнитная карта с определенным числом микромагнитов. В качестве считывающих элементов используются высокочувствительные магнитоуправляемые ИС. Изменяя число микромагнитов и сочетание их полюсов, можно сравнивать полученный код с заложенным в память процессора. При совпадении кодов замка и процессора на выходе электронной схемы кодового замка возникает сигнал «открыто», что приводит к срабатыванию электропривода, а если коды не совпадают, то образуется сигнал «тревога».

Рис. 5.164. Устройство кодового замка на магнитных датчиках

Датчик температуры

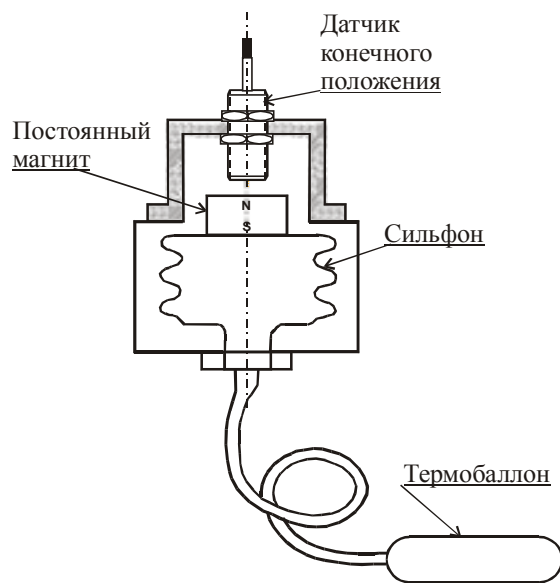


Рис. 5.165. Принципиальная схема датчика температуры

На рис. 5.165 приведена принципиальная схема магнитного датчика температуры. Действие датчика основано на зависимости от температуры объема (давления) вещества, заполняющего термосистему, состоящую из термобаллона и сильфона. Обычно термосистему заполняют веществом, обладающим максимальным температурным коэффициентом объемного расширения.

Термочувствительным элементом датчика является термобаллон, размещаемый в месте контроля. Изменение температуры вызывает изменение давления в термосистеме, что приводит к перемещению постоянного магнита, закрепленного на сильфоне. Перемещение магнита регистрируется магнитным датчиком перемещения.

В зависимости от условий применения в качестве МД могут использоваться как цифровые, так и аналоговые датчики перемещения.

Магнитные датчики аналогичной конструкции могут использоваться в агрессивных и взрывоопасных средах для контроля как положительных, так и отрицательных температур.

Система точного поддержания уровня жидкости

На рис. 5.166 дана структурная схема системы точного поддержания уровня жидкости. На рис. 5.167 и 5.168 приведены принципиальные электрические схемы основных блоков системы.

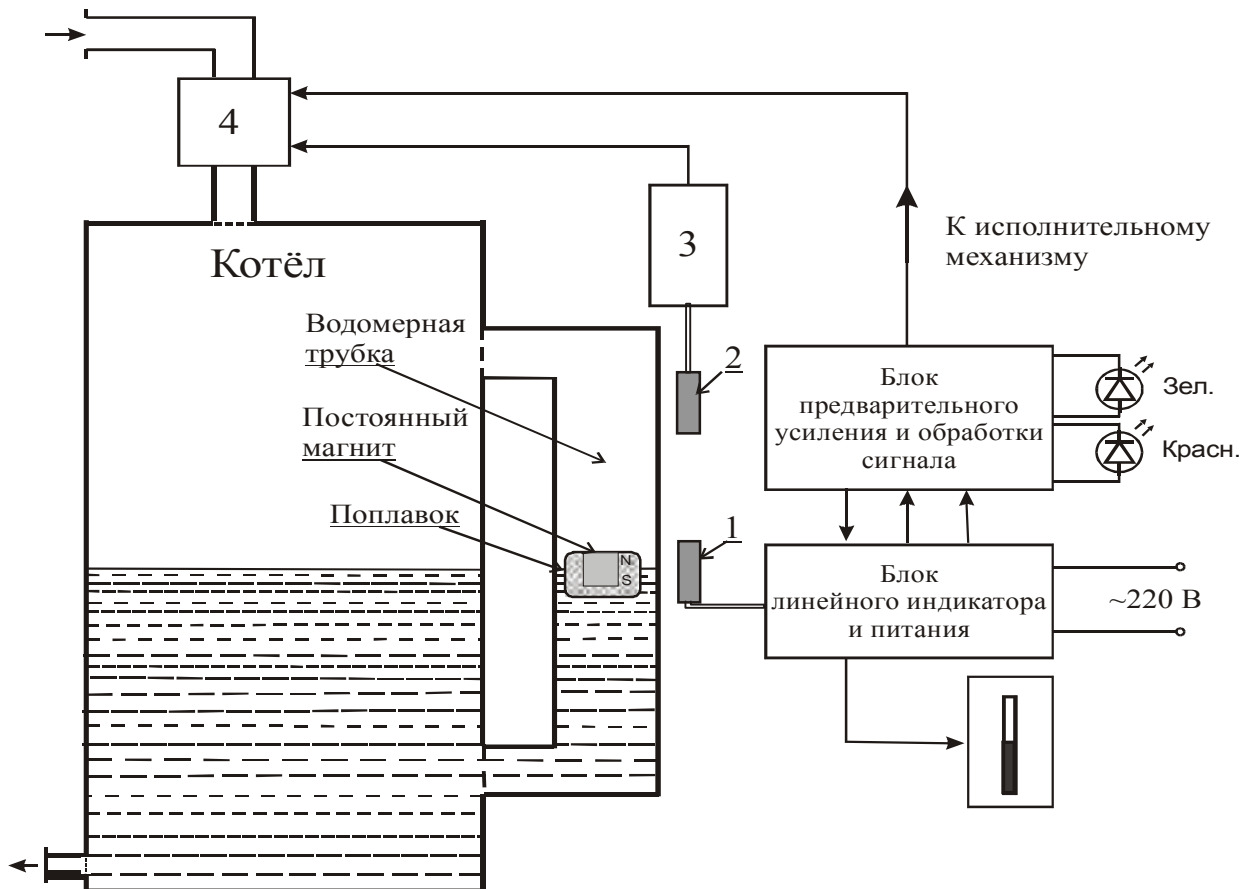


Рис. 5.166. Структурная схема системы точного поддержания уровня жидкости: 1 – магнитный датчик точного уровня; 2 – магнитный датчик предельного уровня; 3 – схема обработки сигнала датчика предельного уровня; 4 – исполнительный механизм с встроенной схемой управления

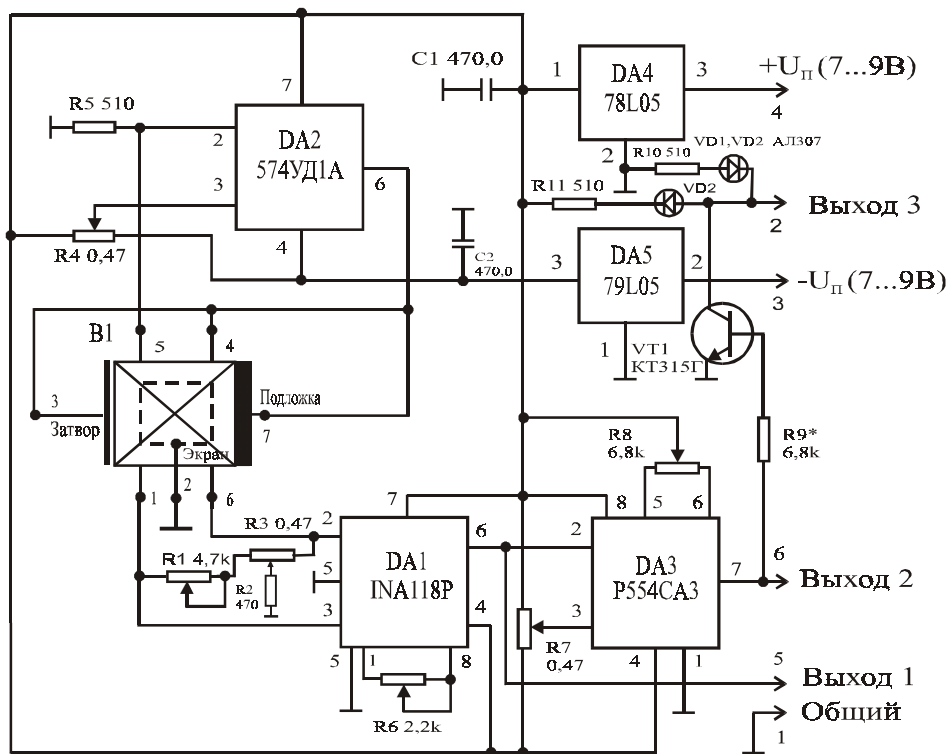


Рис. 5.167. Электрическая схема блока предварительного усиления и обработки сигнала датчика точного уровня

В качестве магнитных датчиков точного 1 и предельного 2 уровня использованы два полевых элемента Холла (ПДХ типа FEHS-01). В качестве управляющего элемента применяется постоянный магнит из сплава «самарий–кобальт» ($\varnothing 10$ мм, $L = 6$ мм, $B > 100$ мТл), вклеенный в пенопластовый поплавок ($\varnothing 20$ мм, $L = 25$ мм), который погружен в водомерную трубку контролируемого объекта.

Принцип работы системы (рис. 5.166) достаточно прост. Сигнал датчика точного уровня усиливается и обрабатывается блоком, электрическая схема которого приведена на рис. 5.167. В качестве усилителя сигнала ПДХ (B1) используется интегральная схема инструментального усилителя типа INA-118P (DA1). Операционный усилитель DA2 применяется в качестве источника тока для питания элемента B1. Интегральные схемы DA4 и DA5 используются как стабилизаторы напряжения питания блока. Блок питается от выпрямителя, расположенного в блоке линейного индикатора (рис. 5.168).

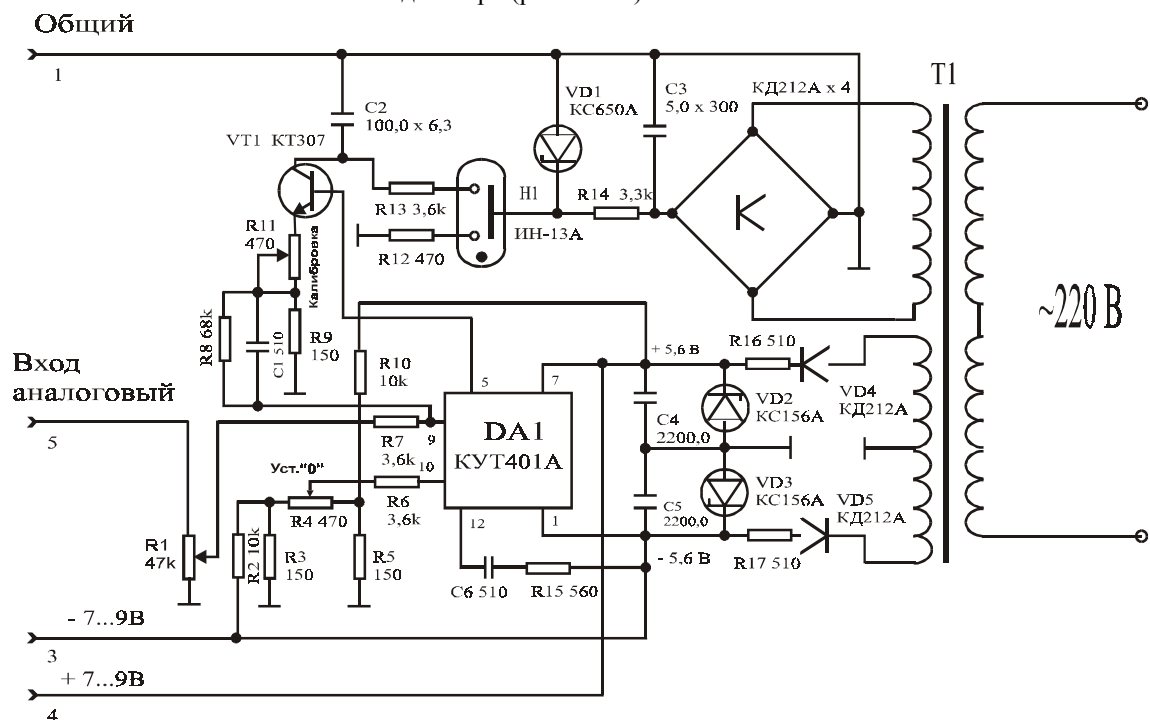


Рис. 5.168. Электрическая схема блока линейного индикатора и питания

Усиленный элемент Холла В1 поступает в аналоговой форме на выход (выход 1) и на компаратор DA3. При «всплытии» поплавка с магнитом выше установленного уровня на выходе компаратора вырабатывается сигнал, открывающий выходной транзистор VT1. В результате на выходе 3 появляется сигнал, поступающий на исполнительное устройство и выключающий насос подкачки жидкости.

Датчик предельного уровня 2 служит для предупреждения перелива. Он имеет свою схему усиления и обработки сигнала 3. При достижении поплавком уровня датчика 2 происходит срабатывание исполнительного механизма, выключающего насос или, в случае необходимости, включающего клапан слива (на рис. 5.165 не показан).

Аналоговый сигнал с выхода 3 (рис. 5.167) поступает на вход блока линейного индикатора (рис. 5.168).

Блок линейного индикатора (рис. 5.168) работает следующим образом. Аналоговый сигнал поступает через потенциометр R1 на вход операционного усилителя DA1, а с него на базу транзистора VT1, управляющего индикатором Н1. В качестве Н1 используется газоразрядный линейный индикатор типа ИН-13А.

Чувствительность блока линейного индикатора составляет 1 мм (перемещения поплавка) на всю шкалу (> 100 мм).

Точность срабатывания датчика точного уровня составляет $\pm 0,1$ мм.

5.10.2. Примеры использования МД в автомобильной технике и промышленном оборудовании

Ниже без объяснений приводятся примеры использования магнитных датчиков.

Применение МД в автомобильной технике

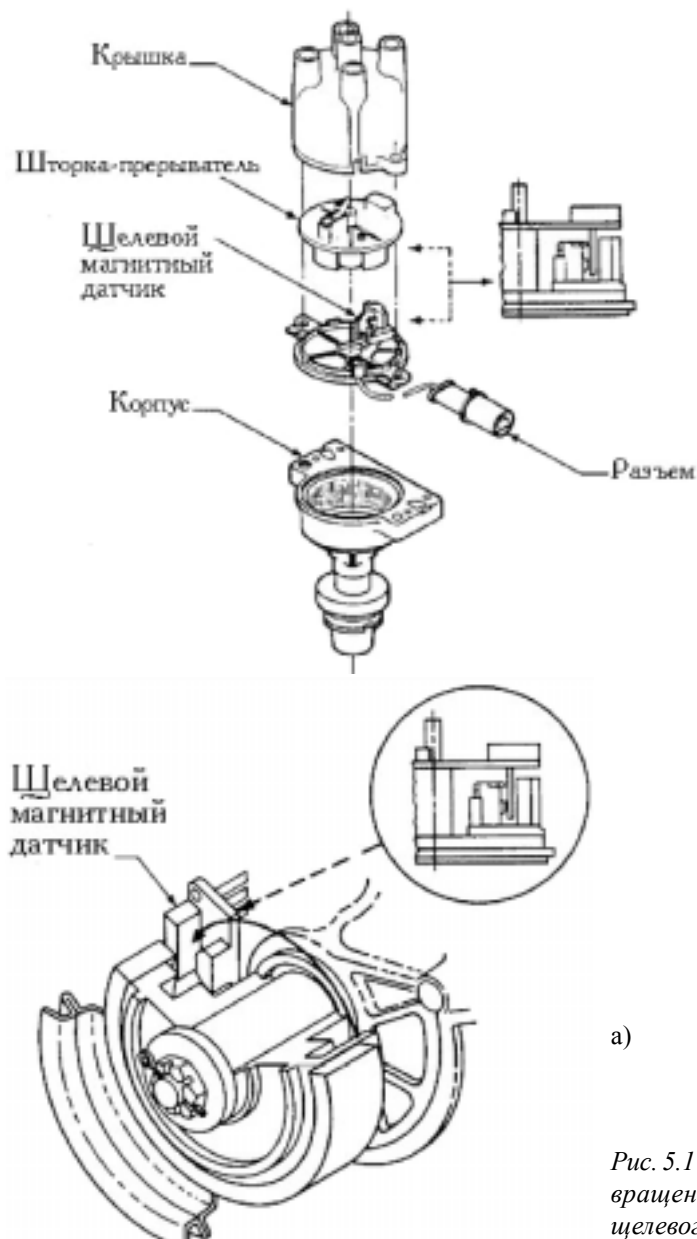
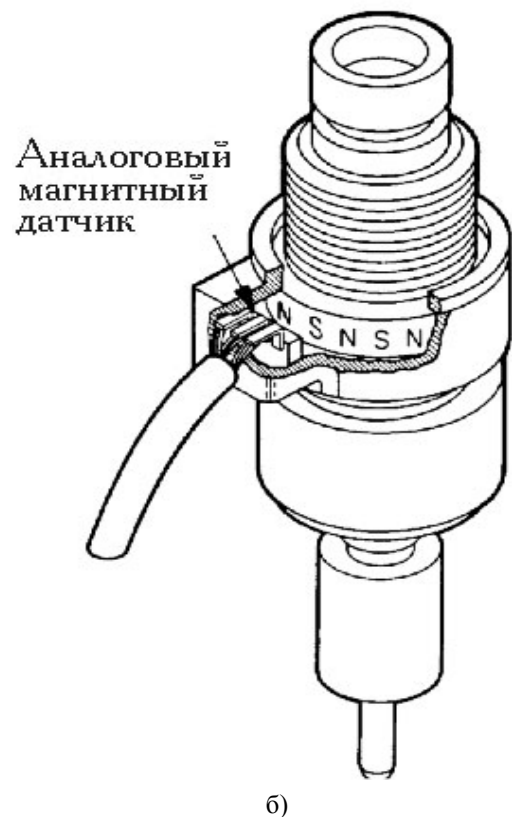


Рис. 5.169. Использование щелевого магнитного датчика в системе электронного зажигания



а)

б)

Рис. 5.170. Использование в системах измерения скорости вращения и угла поворота магнитных датчиков: а – щелевого; б – аналогового

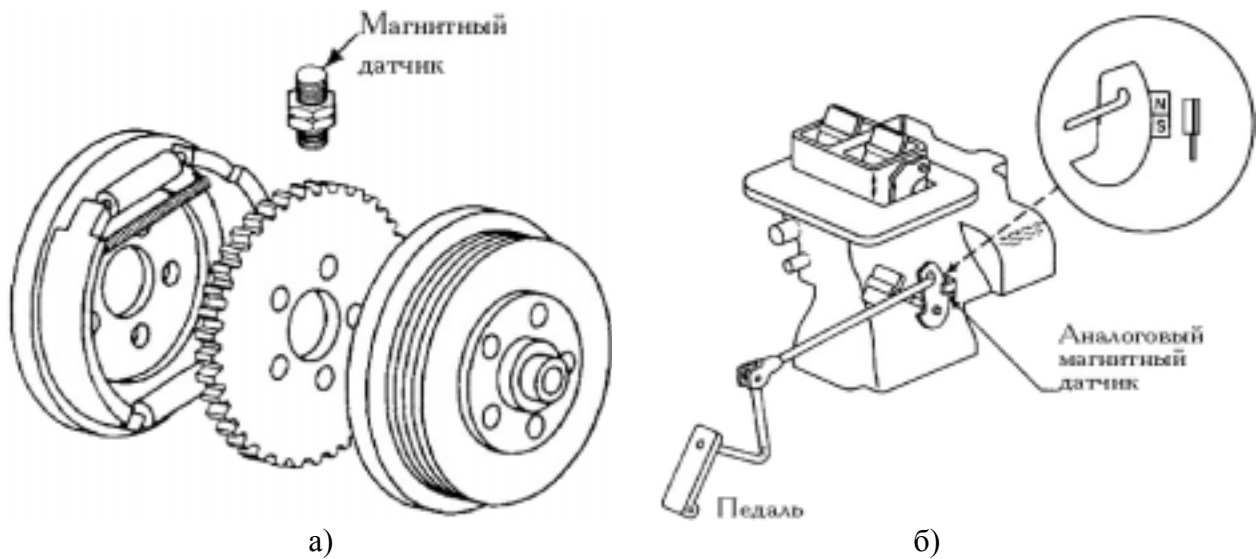


Рис. 5.171. Использование магнитных датчиков в системах: а – предупреждения заносов; б – определения положения педали газа

Применение МД в других областях техники

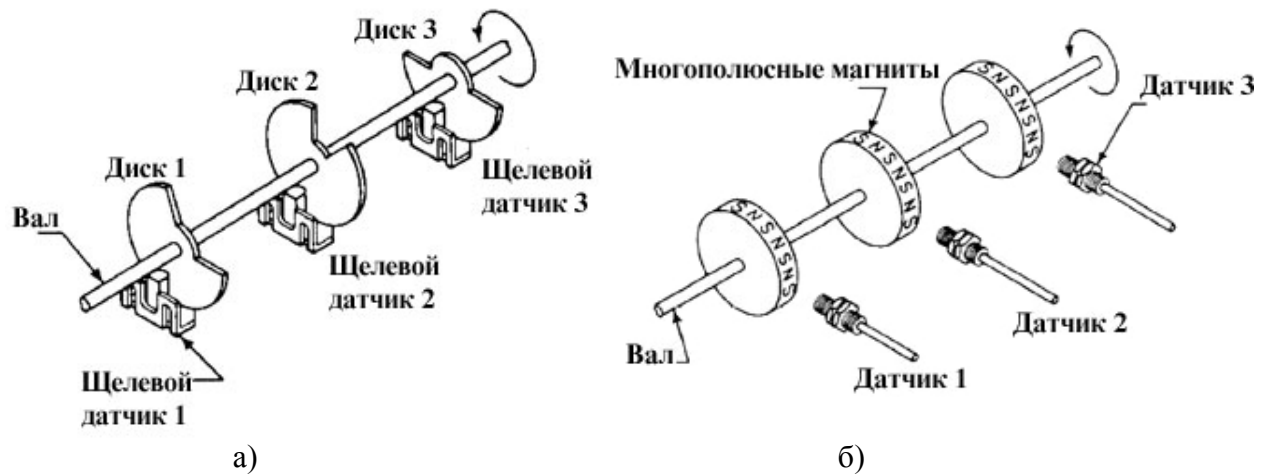


Рис. 5.172. Использование в многоразрядных системах определения угла поворота и скорости вращения магнитных датчиков: а – щелевых, б – торцевых

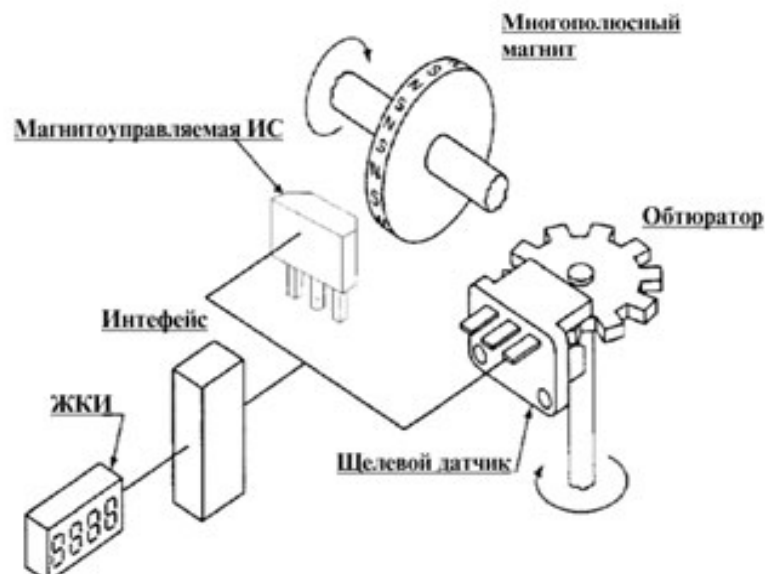


Рис. 5.173. Совместное использование магнитных датчиков в системах определения угла поворота и скорости вращения

Рис. 5.174. Вариант использования МУМ и МЧМС в датчике давления

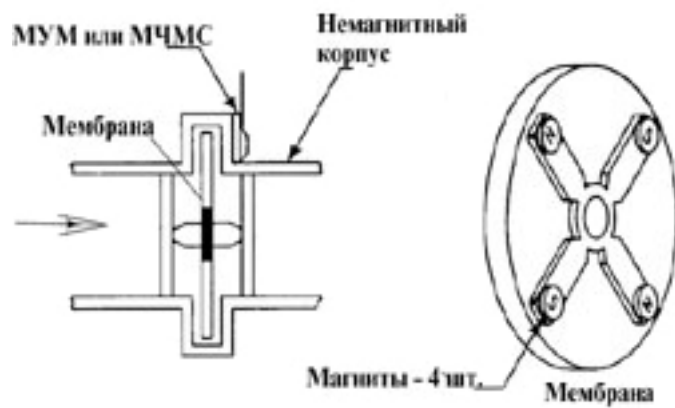
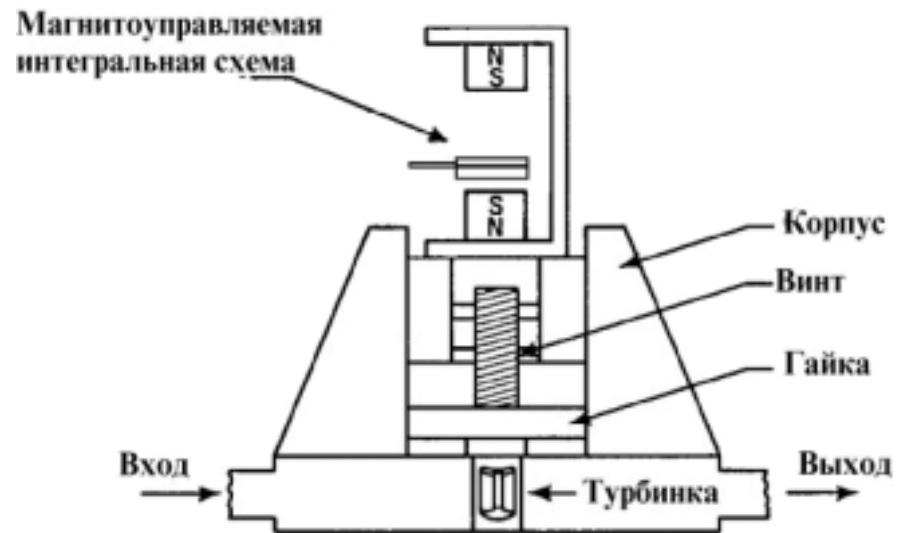


Рис. 5.175. Вариант использования МУМ и МЧМС в датчике напора

Рис. 5.176. Использование магнито-чувствительной микросхемы в качестве датчика натяжения конвейерной ленты

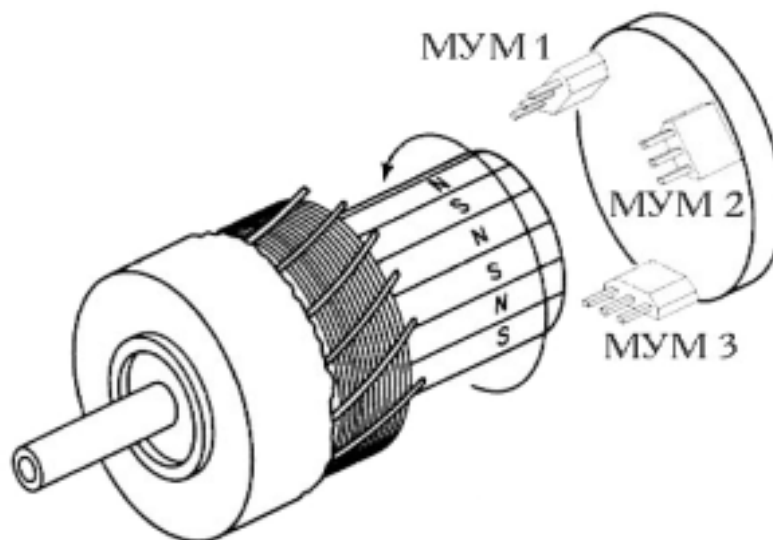
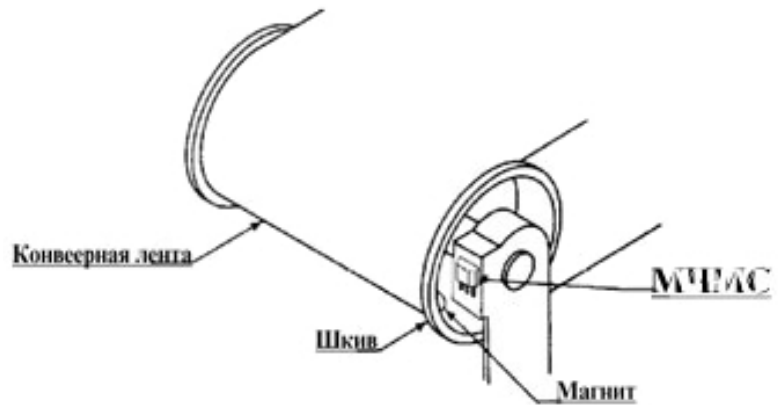


Рис. 5.177. Использование МУМ в качестве датчиков положения ротора в бесколлекторном электродвигателе

5.10.3. Примерный перечень датчиков, применяемых в автомобильной технике

На долю автомобильной техники приходится значительный объем, выпускаемых в мире датчиков, количество которых может достигать в современном автомобиле от 50 до 500 шт.

В таблице 5.30 приведен перечень некоторых типов датчиков, используемых в автомобильной технике. Из 75 наименований датчиков 48 (выделены) могут быть реализованы с применением преобразователей магнитного поля.

Таблица 5.30. Перечень некоторых типов датчиков, используемых в автомобильной технике.

№ п/п	Название и назначение датчика	№ п/п	Название и назначение датчика
1	Датчик атмосферного давления.	38	Датчик температуры охлаждающей жидкости
2	Датчик температуры воздуха.	39	Датчик системы регулирования тяги
3	Датчик влажности воздуха.	40	Датчик расхода топлива.
4	Датчик температуры дороги.	41	Датчик ускорения.
5	Датчик системы предупреждения о гололеде	42	Датчик давления в тормозном цилиндре
6	Датчик температуры в салоне.	43	Датчик включения сцепления
7	Датчик влажности воздуха в салоне.	44	Датчик выравнивания нагрузки
8	Датчик положения сидения	45	Датчик угла поворота передних колес
9	Датчик освещенности салона.	46	Датчик положения рессоры задней оси
10	Датчик уровня шума в салоне.	47	Датчик наклона фар
11	Датчик работы стеклоочистителей	48	Датчик давления в шинах
12	Датчик скорости (спидометр)	49	Датчик наружной освещенности
13	Датчик пройденного пути (одометр)	50	Датчик клиренса (гидравлического подпора)
14	Датчик положения ВМТ	51	Датчик угла поворота рулевой колонки
15	Датчик положения распред. кулака	52	Датчик силы демпфирования
16	Датчик состава топливной смеси	53	Датчик блокировки замка зажигания
17	Датчик давления масла.	54	Датчик блокировки и запираания дверей
18	Датчик давления наддува (для дизеля)	55	Датчик положения и блокировки стекол
19	Датчик детонации	56	Датчик блокировки ремней безопасности
20	Датчик положения педали тормоза	57	Датчик износа тормозных накладок
21	Датчик количества (уровня) топлива	58	Датчик скорости подачи топлива
22	Датчик уровня жидкости в трансмиссии	59	Датчик температуры наружного зеркала
23	Датчик аварийного падения уровня масла	60	Датчик начала обгона
24	Датчик магнитного поля Земли	61	Датчик расстояния до препятствия
25	Датчик износа шин	62	Датчик состояния аккумуляторов.
26	Датчик температуры двигателя.	63	Датчик положения наружного зеркала
27	Датчик количества всасываемого воздуха	64	Датчик уровня тормозной жидкости
28	Датчик углового положения вала.	65	Датчик угла наклона автомобиля
29	Датчик температуры воздуха на впускном трубопроводе	66	Датчик частоты вращения колес- (антиблокировочная система АБС).
30	Датчик положения дроссельной заслонки	67	Датчик положения педали акселерометра
31	Датчик скорости вращения вала (тахометр)	68	Датчик угловой скорости передних и задних
32	Датчик момента зажигания	69	Датчик блокировки и запираания багажника
33	Датчик состава отработавших газов по O_2 (λ -	70	Датчик уровня жидкости промывки стекол
34	Датчик состава отработавших газов по углеводородам.	71	Датчик разряжения (измерения вакуума)
35	Датчик состава отработавших газов по CO .	72	Датчик положения рычага переключения
36	Датчик состава отработавших газов по окислам	73	Датчик освещенности фарами встречного
37	Датчик давления на впускном трубопроводе	74	Датчик работы доплеровского измерителя скорости (антирадара)
		75	Датчики системы диагностики

Список литературы к главе 5

1. Агейкин Д. И., Костина Е. Н., Кузнецова Н. Н. Датчики контроля и регулирования. Справочные материалы. – М.: Машиностроение, 1965. – 928 с.
2. Бараночников М. Л. Магниторезисторы // Радио, 1994, № 7, – с. 42; № 8, – с. 45–46; № 9, – с. 41–42.
3. Бараночников М. Л. Применение магниторезисторов // Радио, 1994, № 11, – с. 34–36; № 12, – с. 36–38.
4. Бараночников М. Л., Колесов Ю. А., Смирнов В. А. Щелевые магнитные датчики ДМИ-1 и ДМИ-2 // Радио, 1992, № 1. – С. 29–31.
5. Березюк Н. Т., Андрущенко А. Г. и др. Кодирование информации (двоичные коды). – Харьков, Вища школа, 1978. – 252 с.
6. Гутников В. С. Интегральная электроника в измерительных устройствах. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
7. Датчик момента искрообразования для автомобильных систем управления двигателем М1ЦРФ. Рекламный проспект. Информприбор. 1989.
8. Датчики. Номенклатура и технические характеристики. Акционерное общество «Сенсор». 2000. – 21 с.
9. Егиазарян Г. А., Стафеев В. И. Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.
10. Ефимов Е. Г. Магнитные головки. – М.: Энергия, 1967. – 80 с.
11. Зайцев Ю. В., Марченко А. Н., Ващенко В. И. Полупроводниковые резисторы в электротехнике. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136 с.
12. Использование устройства KMZ-10. – 1988. – 26 с. (Пер. ст. из журнала «Electronic Components and Applications», 1988, vol/8, #4. – Pp. 229–239.)
13. Карпенков С. Х. Тонкопленочные накопители информации. – М.: Радио и связь, 1993. – 504 с.
14. Кенио Т., Нагамори С. Двигатели постоянного тока с постоянными магнитами. – М., Энергоатомиздат, 1989. – 184 с.
15. Колесниченко О. В., Шишигин И. В., Обрученков В. А. Интегральные микросхемы
16. зарубежной бытовой видеоаппаратуры. Справочное пособие. – Лань, СПб., 1996. – 272 с.
17. Марченко А. Н., Свечников С. В., Смовж А. К. Полупроводниковые сенсорные потенциометрические элементы. – М. // Радио и связь, 1988. – 192 с.
18. Микросхемы Холла серии K1116КП. «Гиперон». – М., 1991. – 58 с.
19. Микросхемы Холла. Магнитные датчики. Проспект ПО «Гиперон». – М., 1989. – 4 с.
20. Осита М. Магнитные датчики. Пер. с японск. // Денси гидзюцу. 1983. Т. 25, № 5. – С. 115–120. 231.
Подлепецкий Б. Интегральные полупроводниковые сенсоры: состояние и перспективы разработок // CHIP NEWS, 1998, № 5. – С. 38–45.
22. Портной Г., Болотин О., Борбот С., Старков С. Современные датчики измерения тока и датчики напряжения // Электронные компоненты, 1997, № 3–4. – С. 30–32.
23. Преснухин Л. Н., Шаньгин В. Ф. Фотоэлектрические преобразователи информации. – М.: Машиностроение, 1974. – 376 с.
24. Сига Х., Мидзутани С. Введение в автомобильную электронику. – М.: Мир, 1989. – 232 с.
25. Синельников А. Х. Электроника в автомобиле. – М.: Радио и связь, 1986. – 96 с.
26. Стучебников В. М. Сенсор или микроэлектронный датчик? // Электронные датчики. Серия 5. Радиодетали и радиокомпоненты. – М.: ЦНИИ Электроника, 1989. – 15 с.
27. Феррети М. Датчики перемещений. Пер. статьи из журнала «Electroque applications». 1986. № 46. – Pp. 23–31.
28. Хенке Г. Линейные и дискретные датчики Холла. Основы теории и приложения. Материал фирмы Honeywell GmbH, D-6050 Offenbach. – 16 с.
29. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. – М.: Энергоиздат, 1986. – 136с.
30. «89 Murata Products. Sensors. (Каталог фирмы Murata). – Pp. 53–57.
31. 3-phase brushless DC Motor controller/drivers – UDN2936W and UDN2936W. Проспект фирмы Allegro Micro Systems Inc. 1999. – 10 p.
32. Complementary output power Hall-effect latch. UGN5275K. Проспект фирмы Allegro MicroSystems. Inc. 1999. – 6 p.
33. Current Sensors ZMC05, ZMC10, ZMC20. Проспект фирмы Zetex Semiconductors. 2000. – 1 p.
34. Dynamic, peak-detecting, differential Hall-effect gear-tooth Sensor. ATS610LSC. Проспект фирмы Allegro MicroSystems Inc. 1999. – 12 p.
35. Dynamic, peak-detecting, differential Hall-effect gear-tooth Sensors. ATS610LSA and ATS611LSB. Проспект фирмы Allegro MicroSystems Inc. 1999. – 16 p.
36. Emerald P. The performance and application of magnetic smart-power sensors // Electronic Engineering, July.– 1989. – Pp. 29–36.
37. F. W. Bell. Solutions. Проспект фирмы F. W. Bell. 1999. – 18 p.

38. Hall Effect Transducers. How to apply them as sensors. MICRO SWITCH a Honeywell Division, 1988. – 280 p.
39. Installation instructions 103SR series proximity switcher. MICRO SWITCH PK 8755 1. Проспект фирмы MICRO SWITCH.
40. Installation instructions AV series vane switch. MICRO SWITCH PK 8757 0. Проспект фирмы MICRO SWITCH.
41. Integrated Angle Sensor Based on the Magnetoresistive Effect. Philips Semiconductors-Systems Laboratory Hamburg. 13 October, 1997. – 6 p.
42. MICRO SWITCH. Sensing and Control. Solid State Sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1997.
43. Model CLO300/500. Closed Loop Hall Effect. Проспект фирмы F. W. Bell. 1999. – 2 p.
44. Power Hall Sensor/Drivers for brushless DC Motors. UDN3625M and UDN3626M. Проспект фирмы Allegro MicroSystems. Inc. 1999. – 8 p.
45. Programmable, true power-on, Hall-effect proximity Sensor. ATS535CSB and ATS535JSB. Проспект фирмы Allegro MicroSystems. Inc. 1999. – 12 p.
46. Ron Lawrence, Paul J. Rosch, Judith Plowden. Magnet Therapy. The pain cure alternative. (Магнитотерапия. Альтернативный метод облегчения боли. Пер. с англ. – М.: КРОН-ПРЕСС, 1998. – 234 с.)
47. Rotary Position Sensor RP Series. Проспект фирмы «Honeywell». 1999. – 4 p.
48. RS Components. Catalogue, 1998. – 2000 p. (Каталог фирмы RS Components.)
49. Sensors. Magnetic pattern recognition Sensors BS05N/05C SERIES. (Проспект фирмы Murata. 1999. – 1 p.)
50. Siemens Component Service. Preferred Products 1977. – Pp. 38–43.
51. Siemens Component Service. Preferred Products 1997. (Каталог фирмы Siemens Aktiengesellschaft.)
52. Solid State Sensors. Position, current, flow, liquid level and temperature sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1989. – Pp. 4–48.
53. TLE4923 Dynamic Differential Hall Effect Sensor IC. Проспект фирмы Siemens. 1998. – 18 p.
54. Zero-speed, self-calibrating, non-oriented, Hall-effect gear-tooth Sensor ATS632LSA. Проспект фирмы Allegro MicroSystems Inc. 1999. – 12 p.

Глава 6. Магнитоэлектронные устройства

Магнитоэлектронные устройства (МЭУ) – это устройства, которые наряду с преобразованием магнитного поля выполняют и иные функции и в которых в одном корпусе размещаются магниточувствительный элемент, электронная схема обработки сигнала и дополнительные элементы, расширяющие функции МЭУ. Эти элементы обеспечивают термостабилизацию магниточувствительного элемента; защиту устройства от воздействия сверхнизких и сверхвысоких напряжений и коротких замыканий по выходу; защиту от перегрева и ошибочного изменения полярности источников питания; аналого-цифровое и цифро-аналоговое преобразование сигналов ПМП и сигналов управления магнитоэлектронным устройством. МЭУ, в отличие от магнитных датчиков, не только выполняют преобразовательные функции, но и используют генерируемый сигнал непосредственно для управления объектом и (или) индицирования его состояния.

Функциональные магнитоэлектронные устройства (ФМЭУ) содержат дополнительные элементы (функциональные электронные узлы, валы, пружины, поводки, кодирующие диски, тонары, муфты и т.д.), которые выполняют заданные функции. Конструктивно функциональные магнитоэлектронные устройства выполнены так, что все их узлы и детали неразрывно связаны между собой и представляют единое целое.

К магнитоэлектронным устройствам относятся бесконтактные переключатели и клавишные модули; бесконтактные переменные резисторы; устройства для определения направления на источник магнитного поля и предсказания магнитных бурь; устройства, используемые в магнитной дефектоскопии и др.

6.1. Бесконтактные переключатели

Бесконтактные переключатели (БКП) представляют собой магнитоэлектронные ключевые коммутационные устройства с механическим приводом. Они используются в качестве исполнительных устройств дистанционного управления, в качестве базового элемента для некоторых бесконтактных коммутирующих изделий: кнопок, кнопочных, клавишных и др. переключателей. БКП выполняют функции концевых выключателей, которые отключают поступательно движущиеся или поворотные механизмы в конце их хода или поворота. Бесконтактные переключатели отличаются конструкцией механизма, обеспечивающего быстрое срабатывание приводного элемента независимо от скорости перемещения.

Основные параметры бесконтактных переключателей:

- усилие прямого срабатывания (чувствительность переключателя) – это минимальное значение внешней силы, которая должна быть приложена к приводному элементу, чтобы произошло его срабатывание;
- усилие обратного срабатывания – это максимально допустимое значение внешней силы на приводном элементе, при котором исполнительная электронная схема выключателя возвращается в исходное состояние;
- рабочий ход приводного элемента – максимальное значение хода приводного элемента от начального (исходного) положения до положения прямого срабатывания;
- дополнительный ход – предельно допустимое значение хода приводного элемента от положения прямого срабатывания в конечное;
- дифференциальный ход – минимально допустимая величина хода приводного элемента от положения прямого срабатывания до положения обратного срабатывания.

Указанные параметры определяются типом приводного элемента. Конструкция приводного элемента может быть выполнена в виде штока, кнопки, рычага, ролика и т.п. К конструктивным параметрам конечных выключателей относятся: габариты, способы крепления, тип приводного элемента и др.

Применение БКП особенно целесообразно во взрывоопасном оборудовании и при работе в условиях повышенной влажности или при воздействии агрессивных сред: бензина, масла и т.п. Для конструирования магнитоэлектронных бесконтактных переключателей используют любые известные дискретные преобразователи магнитного поля и магнитоуправляемые интегральные схемы на их основе.

Магнитоэлектронные бесконтактные переключатели применяются в различных отраслях промышленности. Их серийный выпуск осуществляют многие зарубежные фирмы. Наиболее известны микроэлектронные бесконтактные переключатели, выпускаемые фирмой Honeywell.

Бесконтактные переключатели фирмы Honeywell

На рис. 6.1 и 6.2 приведены конструкции магнитоэлектронных бесконтактных переключателей серий XL и VX, выпускаемых фирмой Honeywell [37, 50, 67]. В качестве коммутирующих элементов в рассматриваемых БКП используются магнитоуправляемые интегральные схемы.

Принцип действия переключателя состоит в следующем. При нажатии на плунжер, служащий приводным элементом переключателя, магнит перемещается вдоль поверхности магнитоуправляемой микросхемы, что, в свою очередь, приводит к изменению состояния МУМ.

Схема имеет два устойчивых состояния, соответствующих логическому 0 или логической 1. В зависимости от расположения магнита S полюсом вверх или вниз, исходное состояние микросхемы может соответствовать положению «выключено» или «включено».

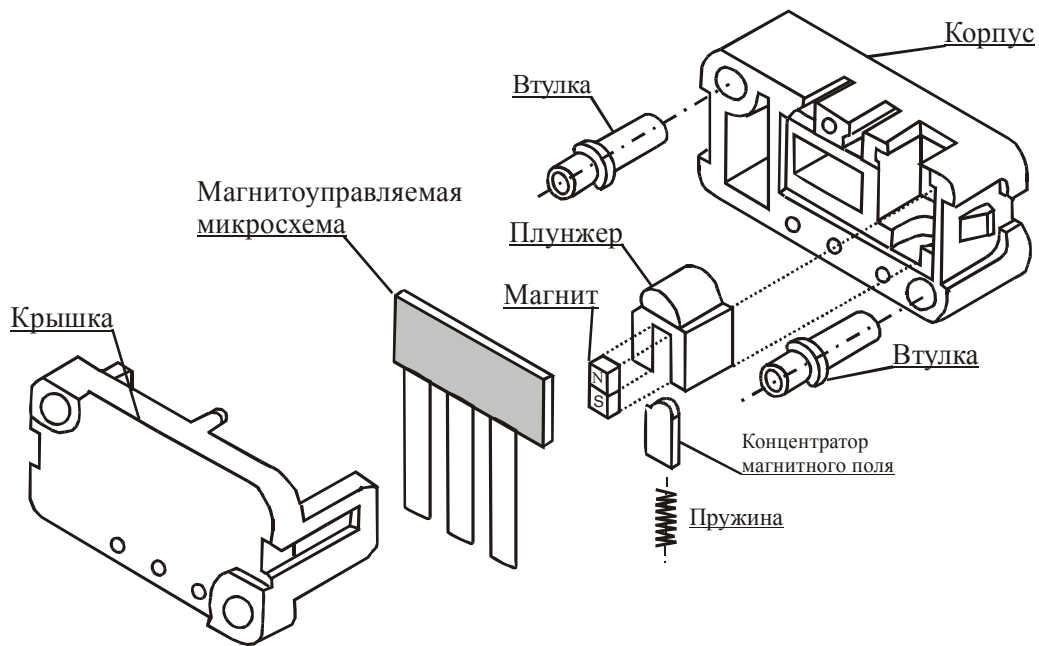


Рис. 6.1. Конструкция бесконтактного переключателя серии XL

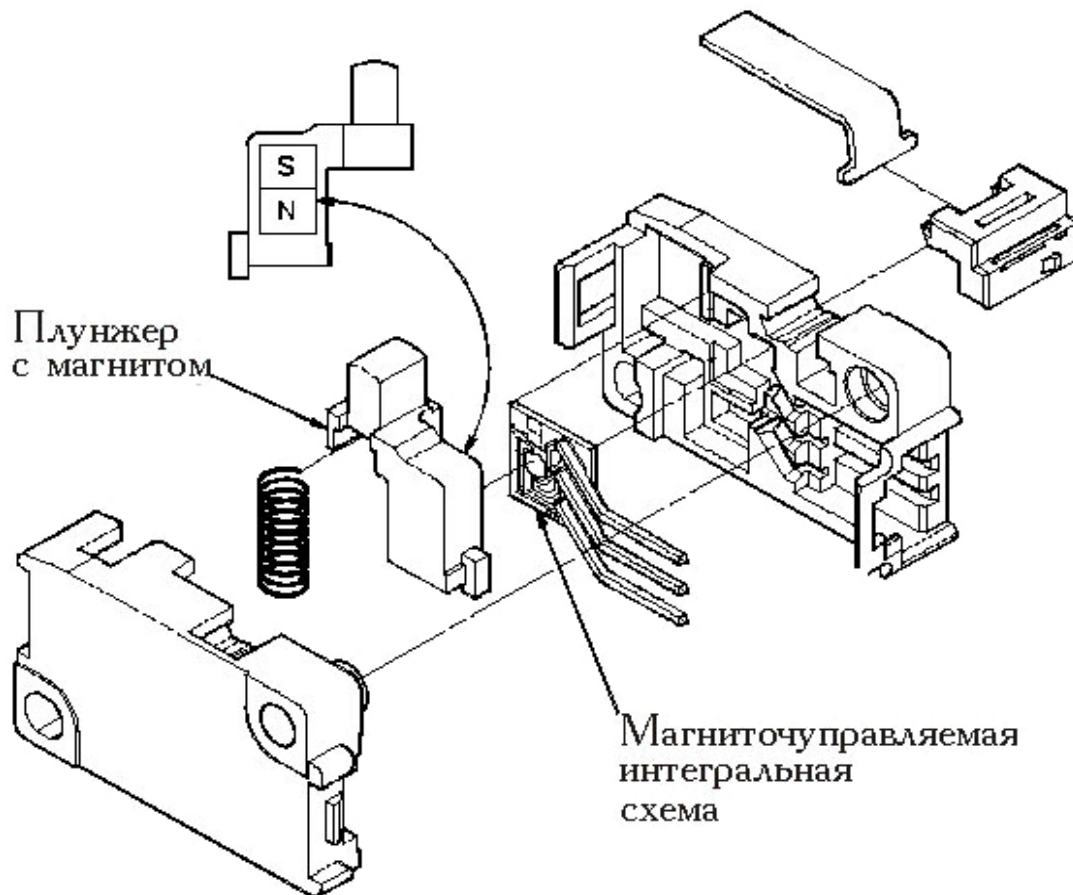


Рис. 6.2. Конструкция бесконтактного переключателя серии VX

Внешний вид и габариты бесконтактных переключателей серий XL и VX, выпускаемых фирмой Honeywell, показаны на рис. 6.3.

Бесконтактные переключатели серий XL и VX могут служить устройствами, непосредственно коммутирующими слаботочные электрические цепи. Однако при токе коммутации более 8–20 мА (в зависимости от типа БКП) они должны использоваться совместно с мощными логическими схемами или со вторичными элементами электронных устройств автоматического оборудования и приборов.

Главное преимущество бесконтактных переключателей в их высокой надежности, быстродействии и большом ресурсе (до 10^8 – 10^{10} срабатываний). В табл. 6.1 приведены сравнительные характеристики конечных выключателей механического и бесконтактного типов [5, 37, 51, 68].

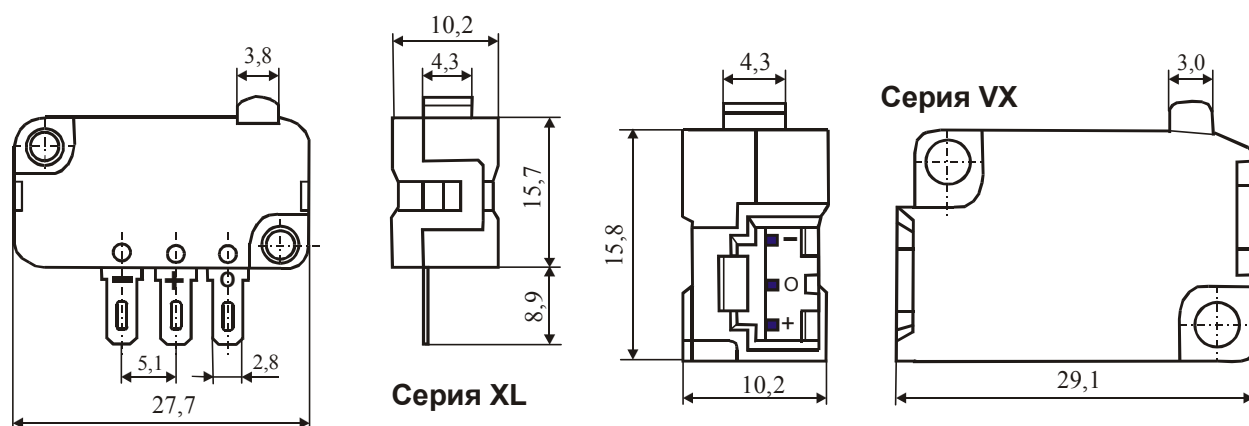


Рис. 6.3. Внешний вид и габариты бесконтактных переключателей серий XL и VX, выпускаемых фирмой Honeywell

. Таблица 6.1. Сравнительные характеристики механических и бесконтактных переключателей

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип микропереключателя	
		Механические микропереключатели П1М9 (Россия), (V33101MD18)	Бесконтактные выключатели серий XL,VX (Honeywell)
1	Усилие срабатывания, Нс	8,5	0,1...0,83 (XL) 0,1...0,84 (VX)
2	Усилие отпускания, Нс	0,5	Н/Д
3	Максимальный коммутируемый ток, мА	0,2...5000 (0,1...2500)	8...20
4	Максимальный потребляемый ток, мА	0	4...15
5	Рабочий ход приводного элемента, мм	3,0 (1,0)	1,52 (XL) 2,16 (VX)
6	Дополнительный ход, мм	2,2 (0,5)	0,86 (XL) 1,02 (VX)
7	Дифференциальный ход, мм		0,18 (XL) 0,30 (VX)
8	Максимальное число переключений	до 1×10^5 (до 1×10^6)	$1,0 \times 10^7$ (XL) $1,0 \times 10^8$ (VX)
9	Диапазон рабочих температур, °C	-60...+125 (-60...+185)	-40...+70
10	Диапазон атмосферного давления, кПа	$0,6...10^4$	На работу не влияет
11	Максимальная относительная влажность	98% при +40°C	98% при +40°C
12	Габаритные размеры, мм	27,8 x 16 x 11 (27,8 x 16 x 10)	27,7 x 15,7 x 10,2 (XL) 29,1 x 15,8 x 10,2 (VX)

Основные параметры и характеристики магнитоэлектронных бесконтактных переключателей, выпускаемых фирмой Honeywell, приводятся в главе 20 тома 2.

6.2. Бесконтактные клавишные модули

Ввод информации с помощью клавиатурных пультов является наиболее распространенным способом общения человека с техникой, который характеризуется простотой процесса ввода данных, привычностью в обращении и несложностью технических средств реализации.

Опыт эксплуатации вычислительной техники показал, что достоверность ручного ввода данных с помощью клавишных устройств в 10–50 раз ниже достоверности обработки информации остальными узлами ВТ [29]. В связи с этим очевидна необходимость создания таких клавишных устройств, которые по своим техническим показателям исключали бы возможность добавления, пропуска или искажения вводимой информации при преобразовании ее в исполнительный сигнал.

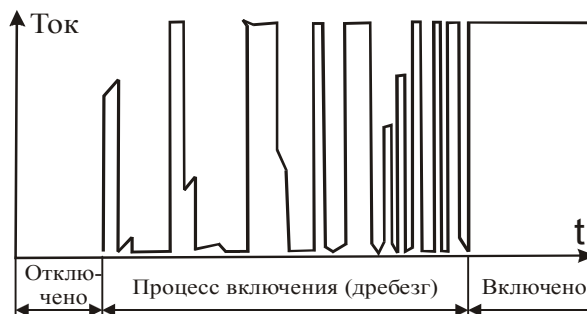
Кроме того, клавишные устройства должны отвечать современным эргономическим требованиям, способствовать безошибочной работе оператора, повышать производительность его труда, обладать повышенным сроком службы, быть простыми по конструкции и технологичными в изготовлении. Клавишные устройства должны давать возможность непосредственного сочленения с быстродействующими электронными элементами управляемых цепей.

В некоторых случаях к ним предъявляются специальные требования по взрывобезопасности, пыле- и влагонепроницаемости, сохранению работоспособности в агрессивных и радиоактивных средах, в условиях повышенной вибрации и ударных нагрузок. Важным требованием является соблюдение высокой степени унификации клавишных устройств для осуществления быстрого и легкого построения различных вариантов клавиатур, пультов управления и др. До последнего времени были наиболее распространены пульты для ручного ввода информации, снабженные механическими контактами.

Клавиши с механическими контактами наряду с такими преимуществами, как малое переходное сопротивление контактов, возможность одновременного коммутирования нескольких относительно мощных цепей, дешевизна и др., имеют существенные недостатки, которые не позволяют использовать их для многих устройств современной техники. К таким недостаткам относятся: наличие искрообразования, явлениедребезга и залипания контактов, обгорание и эрозия контактов, необходимость частых профилактических осмотров, невысокое быстродействие, влияние окружающей среды (влажности, запыленности и т.д.) на состояние контактных поверхностей, чувствительность к вибрации и ударам.

На рис. 6.4 показана осциллограмма тока, проходящего через механические контакты при их замыкании. При непосредственном электрическом сопряжении такой клавиши с электронными схемами неизбежно будут возникать сбои и ошибки ввода информации. Кроме того, при сопряжении клавиш на механических контактах с электронными устройствами нарушается общий принцип совместимости.

Рис. 6.4. Типичная осциллограмма тока, проходящего через механические контакты при их замыкании



Совершенствование устройств с механическими контактами привело к созданию герметизированных контактов (герконов), однако и они не обладают требуемой надежностью ввода информации и долговечностью. Объясняется это процессами, возникающими при замыкании и размыкании контактной пары и вызывающими дребезг, залипание контактов, изменение переходных сопротивлений, механическое старение материалов.

Для ликвидации указанных недостатков предлагалось много вариантов конструкций клавиш, в которых коммутация управляемых цепей осуществлялась бесконтактным способом. Были предложены фотоэлектронные, емкостные, магнитные, индукционные и другие принципы бесконтактного управления параметрами электронных цепей. Однако использование каждого из этих принципов, давая определенные преимущества, не привело к оптимальному решению задачи [29].

Проблема создания эффективных бесконтактных клавиш ввода информации успешно решается при использовании современных микроэлектронных преобразователей магнитного поля. У клавиш с использованием ПМП по сравнению с клавишами аналогичного назначения, но построенными на основе других принципов, есть ряд преимуществ:

- длительный срок службы;
- устойчивость к вибрациям и ударам;
- непосредственная совместимость с электронными схемами;
- способность надежно работать в агрессивных и взрывоопасных средах;
- отсутствие необходимости эксплуатационных регулировок и квалифицированного обслуживания;
- возможность сопряжения со стандартными логическими схемами (в том числе и для осуществления функции логических элементов).

Переключатели клавишного типа относятся к нажимным устройствам и предназначены для коммутации электрических цепей с помощью ручного привода.

Клавишные переключатели характеризуются следующими параметрами:

- усилием или моментом переключения;
- числом положений фиксации;
- способом фиксации;
- длиной рабочего хода;
- максимальным количеством переключений до полного отказа.

Одним из важных эксплуатационных показателей является скорость их работы, выражаемая максимальным числом нажатий в секунду. По этому параметру О. К. Хомерики [29] предлагает разделить все кнопки на три группы:

- устройства высокого быстродействия (до десяти нажатий в секунду). К ним относятся клавиатуры пишущих машинок, электронных клавишных вычислительных машин и т.п.;
- устройства среднего быстродействия (до пяти нажатий в секунду). К ним относят клавиатуры пультов управления информационно-измерительной и вычислительной техники, систем управления, кассовых аппаратов и т.п.;
- устройства малого быстродействия (менее одного нажатия в секунду). Это, например, клавиши для управления радиоэлектронной аппаратурой – магнитофонами, телевизорами и др., – характеризующиеся одноразовым воздействием в течение относительно длительного промежутка времени.

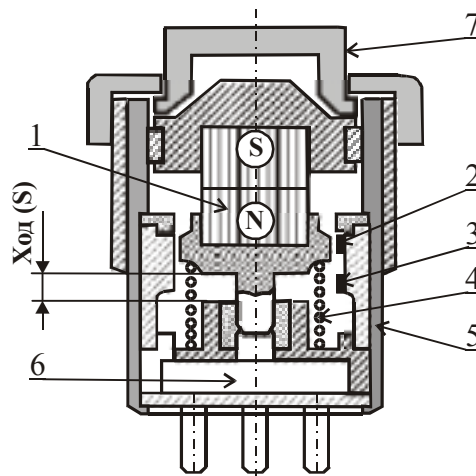
Проектирование бесконтактных клавишных переключателей с учетом всех предъявляемых к ним требований представляет собой сложную задачу и широко обсуждается в специальной литературе [24, 29].

Бесконтактные клавишные переключатели, как правило, выполняются в виде достаточно унифицированных магнитоэлектронных устройств, которые получили название *бесконтактных клавишных модулей* (БКМ). Из таких модулей формируются блоки клавиатур и другие аналогичные устройства. Наиболее перспективными бесконтактными клавишными устройствами считаются клавишные модули, выполненные с применением современных микроэлектронных преобразователей магнитного поля. Ниже рассмотрены некоторые конструкции таких модулей.

Клавишные модули, реализованные с применением магниторезисторов

На рис. 6.5 схематически приведена конструкция бесконтактного клавишного модуля с пружинным возвратом подвижной части в исходное состояние [27, 68].

Рис. 6.5. Конструкция клавишного модуля с пружинным возвратом подвижной части в исходное состояние: 1 – подвижный постоянный магнит; 2, 3 – магниторезисторы; 4 – пружина; 5 – корпус модуля; 6 – электронная схема; 7 – головка клавишного модуля



Принцип действия клавишного модуля сводится к следующему. При нажатии на головку клавишного модуля 7 перемещается встроенный в нее постоянный магнит 1, что вызывает изменение напряженности магнитного поля и, как следствие, изменение сопротивления магниторезисторов 2 и 3. Пружина 4 служит для возврата кнопки в исходное положение. Магниторезистор 2 выполняет функции замыкающего контакта, а магниторезистор 3 – размыкающего.

В зависимости от конструкции кнопки изменение сопротивления магниторезисторов управляет либо непосредственно вторичной цепью, либо встроенной в корпус электронной схемой 6, обеспечивающей переключение в цепи нагрузки.

Магнит модуля выполнен из сплава альнико. Для уменьшения магнитного сопротивления между полюсами магнита 1 и для экранирования магниторезисторов от воздействия внешних магнитных полей корпус модуля 5 выполнен из магнитомягкого железа. В кнопках используются отечественные магниторезисторы типа СМ4-1 с номинальным сопротивлением 40 Ом при допустимом отклонении $\pm 20\%$.

Сопротивление магниторезисторов при нажатии на головку модуля изменяется не менее чем в 5 раз.

Зависимости сопротивления R_B магниторезисторов, выполняющих функции замыкающего и размыкающего контактов, от перемещения S подвижного магнита для модуля рассматриваемой конструкции приведены на рис. 6.6.а,б[11].

Изменение температуры оказывает определенное влияние на параметры магниторезисторов: с увеличением температуры относительное изменение их сопротивления в магнитном поле уменьшается (рис. 6.6.б).

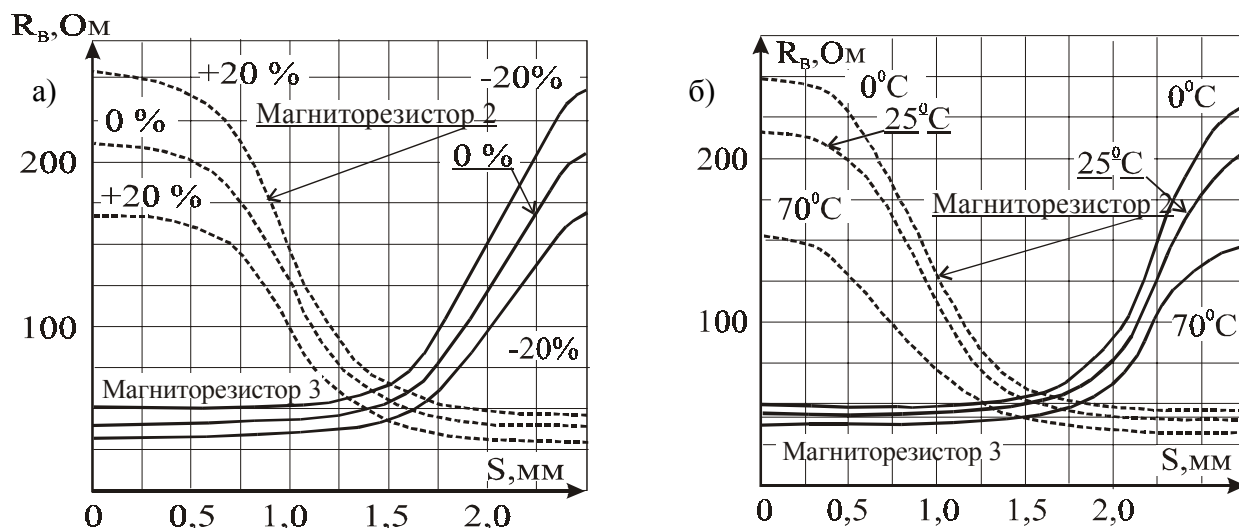


Рис. 6.6. Зависимости сопротивления (R_B) магниторезисторов 2 и 3: а – от перемещения (S) подвижного магнита; б – от температуры

Изменение температуры оказывает определенное влияние на параметры магниторезисторов: с увеличением температуры относительное изменение их сопротивления в магнитном поле уменьшается (рис. 6.6б).

Клавишный модуль, конструкция которого приведена на рис. 6.5, надежно работает в интервале температур от 0 до +75 °С. Максимальная частота коммутации 10 включений в 1 с. Ресурс работы, определяемый механическим износом элементов конструкции, составляет не менее 10^6 включений.

При необходимости повысить кратность изменения сопротивления или мощность цепи коммутации в кнопку встраивают усилительный или ключевой каскад на транзисторах, тиристорах или интегральных схемах. Электрическая схема клавишного модуля с простейшим усилителем на одном транзисторе приведена на рис. 6.7а. Такой модуль может быть изготовлен с встроенными в них ключевыми каскадами в двух исполнениях, осуществляющих функции замыкающих или размыкающих контактов.

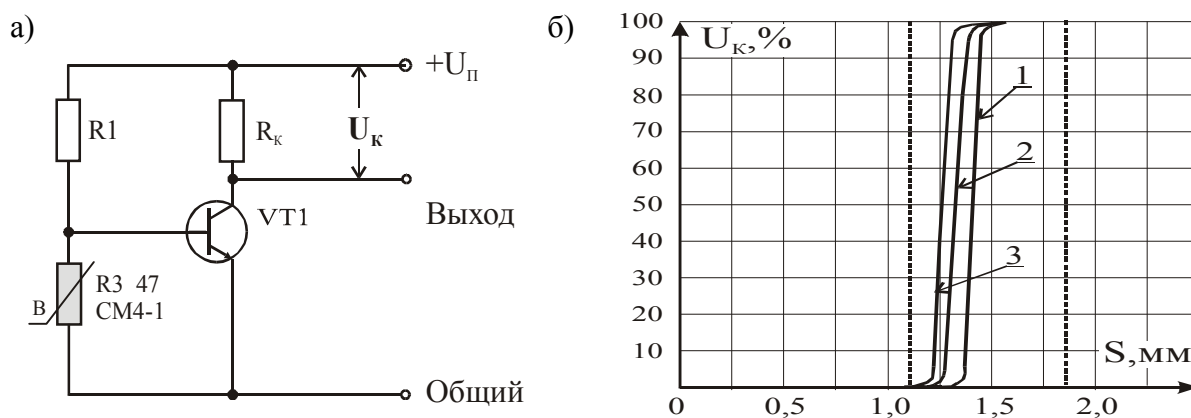
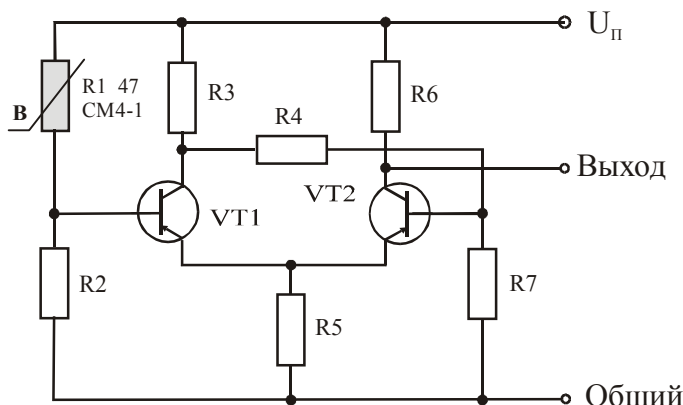


Рис. 6.7. Клавишный модуль с простейшим ключом на одном транзисторе: а – электрическая схема; б – выходная характеристика при различной температуре: 1 – при +70 °С; 2 – при +25 °С; 3 – при 0 °С

На рис. 6.7б показана зависимость напряжения на коллекторе транзистора VT1 от перемещения магнита кнопки при различных температурах. При нормальной скорости перемещения головки модуля время переключения схемы составляет около 2 мс.

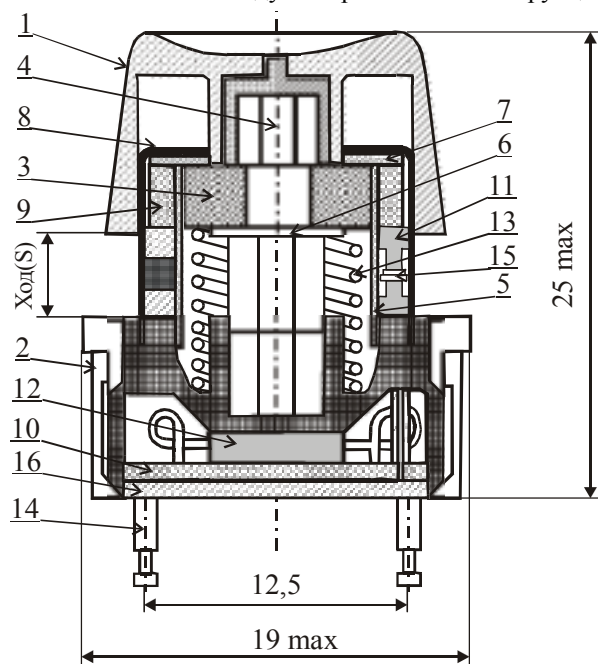
Если же к крутизне коммутационной характеристики предъявляются более высокие требования, то в качестве усилительного каскада используют *триггерные* схемы. Одна из таких схем, применяемых в бесконтактных клавишных модулях на магниторезисторах, приведена на рис. 6.8.

Рис. 6.8. Принципиальная электрическая схема бесконтактного клавишного модуля на магниторезисторе с триггерным каскадом



В СССР были разработаны и выпускались бесконтактные клавишные модули серии ПКБ. Конструкция такого модуля приведена на рис. 6.9.

Рис. 6.9. Конструкция бесконтактного клавишного модуля с пружинным возвратом, выполненная с использованием магниторезистора СМ4-1: 1 – головка модуля; 2 – корпус модуля; 3 – кольцевой постоянный магнит; 4 – толкатель; 5 – полый внутренний цилиндр; 6, 7 – резиновые амортизаторы; 8 – полый наружный цилиндр; 9 – магнитный шунт; 10 – печатная микросхема; 11 – кольцевые магнитопроводы; 12 – резистор; 13 – возвратная пружина; 14 – выводы; 15 – магниторезистор СМ4-1; 16 – дно-заглушка модуля



Основным конструктивным узлом модуля является магнитная цепь, состоящая из кольцевого постоянного магнита 3, кольцевых магнитопроводов 11 и магниторезистора 15, размещенного в месте максимальной концентрации магнитного потока.

Элементами, обеспечивающими движение магнита в вертикальном направлении, служат толкатель 4 и внешний цилиндр 8, которые фиксируют относительное положение магнита и полового цилиндра 5. Устранение свободного вращения съемной головки модуля 1 относительно корпуса переключателя обеспечивается крестовидной формой толкателя 4, ходового отверстия в корпусе и посадочного отверстия в самой головке модуля.

Ограничение крайних положений магнита происходит в верхнем положении высотой наружного цилиндра 8, в нижнем положении – корпусом 2. Ход подвижной системы модуля демпфируется в крайних положениях резиновыми амортизаторами 6 и 7. Возврат клавиши в исходное положение происходит за счет пружины 13 после снятия воздействия внешнего усилия.

Электрические элементы схемы установлены на печатной микросхеме 10. Выводы 14 модуля спроектированы с расчетом выполнения как навесного, так и печатного монтажа. Принципиальная электрическая схема бесконтактных кнопочных модулей ПКБ4, ПКБ5 приведена на рис. 6.10 [11].

Принцип работы клавишных модулей серии ПКБ заключается в следующем (см. рис. 6.9). Под действием внешнего усилия, передаваемого через толкатель 4, магнит 3 переходит в нижнее положение. При этом в модуле типа ПКБ4 магнитный поток не проходит через магниторезистор, шунтируясь магнитным шунтом 9, а в модуле ПКБ5 поток будет максимальным. Этот эффект достигается верхним расположением магниторезистора 15 в модуле типа ПКБ4 и нижним – в ПКБ5. Поэтому модуль типа ПКБ4 имеет на выходе в исходном состоянии потенциал, соответствующий логическому 0, а в ПКБ5 – логической 1.

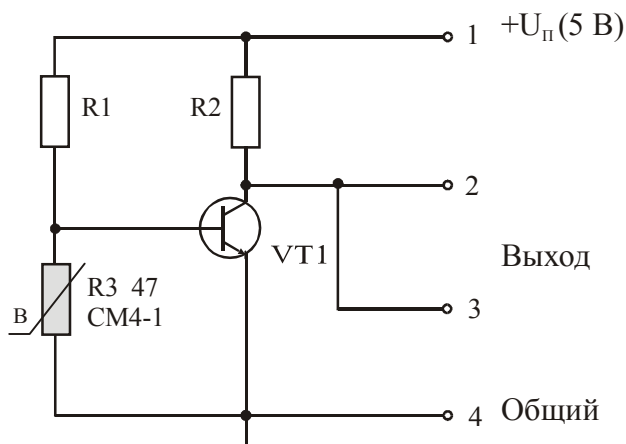


Рис. 6.10. Принципиальная электрическая схема бесконтактных клавишных модулей ПКБ4, ПКБ5

Клавишные модули типа ПКП1, ПКП2, ПКП3 имеют аналогичную конструкцию (см. рис. 6.9).

Модули типа ПКБ1 снабжены индикацией состояния на светодиоде. Принципиальная электрическая схема такого модуля приведена на рис. 6.11.

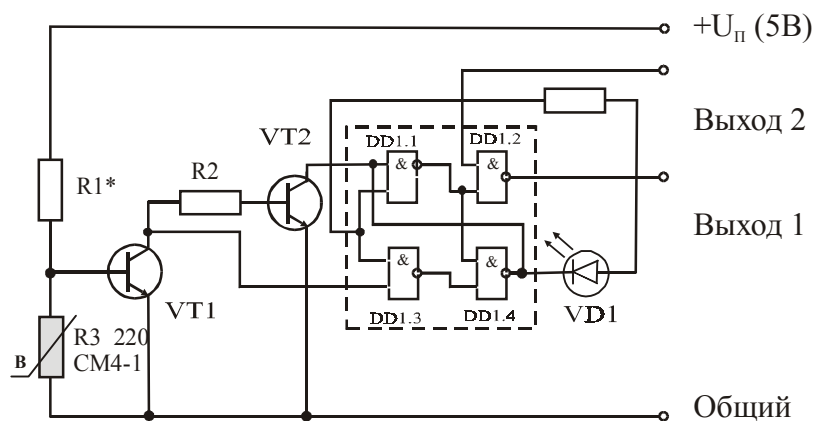


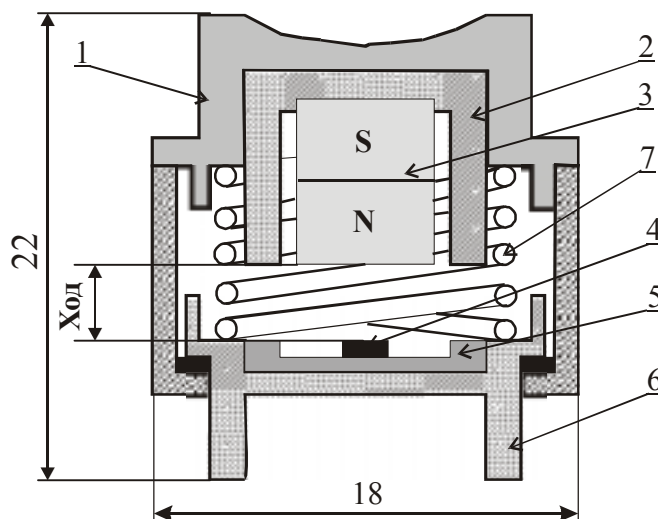
Рис. 6.11. Принципиальная электрическая схема клавишного модуля типа ПКБ1, снабженного индикацией на светодиоде

Основные параметры клавишных модулей серии ПКБ: напряжение питания – $5 \pm 0,5$ В; ток потребления – не более 12 мА (для отдельных типонаименований не более 25 мА); ресурс работы – не менее 10^6 переключений; усилие переключения – 1,5–2,5 Н; интервал рабочих температур – от -60 до $+70$ °С.

Клавишные модули, реализованные с применением магнитодиодов

На рис. 6.12 схематически показана конструкция бесконтактного клавишного модуля с пружинным возвратом, реализованного с использованием магнитодиода.

Рис. 6.12. Конструкция бесконтактного клавишного модуля с пружинным возвратом, выполненная с использованием магнитодиода КД303: 1 – головка модуля; 2 – магнитопровод (ярмо); 3 – подвижный постоянный магнит; 4 – магнитодиод КД303; 5 – магнитопровод (якорь); 6 – корпус модуля; 7 – возвратная пружина



Клавишная головка 1 связана с ярмом 2, которое охватывает соосно расположенный постоянный магнит 3. Магнитодиод 4 установлен под центром торца магнита 3 на замыкающем ферромагнитном якоре 5, который находится на дне корпуса 6. Расстояние от краев торца магнита 3 до внутренней поверхности охватывающего ярма 2 меньше расстояния от торца магнита 3 до замыкающего якоря 5, но больше толщины магнитодиода 4. Ярмо 2 с магнитом 3 и клавишная головка 1, подпружиненные пружиной 7, могут перемещаться вдоль оси клавишного модуля на расстояние, равное рабочему ходу.

В исходном положении магнит 3 с ярмом 2 удалены от якоря 5 на максимальное расстояние и длина рабочего воздушного зазора больше зазора между краями торца магнита 3 и внутренней поверхностью ярма 2. При этом магнитный поток в основном замыкается вне рабочего воздушного зазора и на магнитодиод 4 магнитное поле практически не воздействует.

Устройство (рис. 6.12) работает следующим образом. При нажатии на клавишную головку 1 ярмо 2 с магнитом 3 перемещается вдоль оси клавиши, уменьшая длину рабочего зазора. Когда она станет меньше расстояния между краями торца магнита и внутренней поверхностью ярма, происходит изменение направления замыкания основной части магнитного потока из зоны рассеяния в зону рабочего воздушного зазора и почти весь магнитный поток начинает пронизывать магнитодиод 4. Усилие нажатия на клавишную головку, будучи минимальным в начале хода, возрастает по мере сжатия пружины, а затем падает за счет взаимодействия (притяжения) магнита 4 и якоря 5.

Постоянный магнит размером $5 \times 5 \times 4$ мм изготовлен из феррита бария марки 16БА190, перепад магнитной индукции в зазоре составляет не менее 0,2 Тл. Ресурс работы – не менее 10^6 циклов при скорости 10 нажатий в 1 с [29].

Клавишные модули, реализованные с применением МУМ

Первые электронные кнопки с применением элементов Холла и магнитоуправляемых интегральных микросхем были изготовлены фирмами Nucleonic Product и Honeywell в начале 80-х годов. В настоящее время подавляющее большинство современных магнитоэлектронных клавишных модулей и клавиатур для ПЭВМ выполняется с применением кремниевых магнитоуправляемых интегральных микросхем [10, 28, 37].

На рис. 6.13 приведен вариант конструкции бесконтактного клавишного модуля с беспружинным возвратом, реализованный с использованием магнитоуправляемой микросхемы.

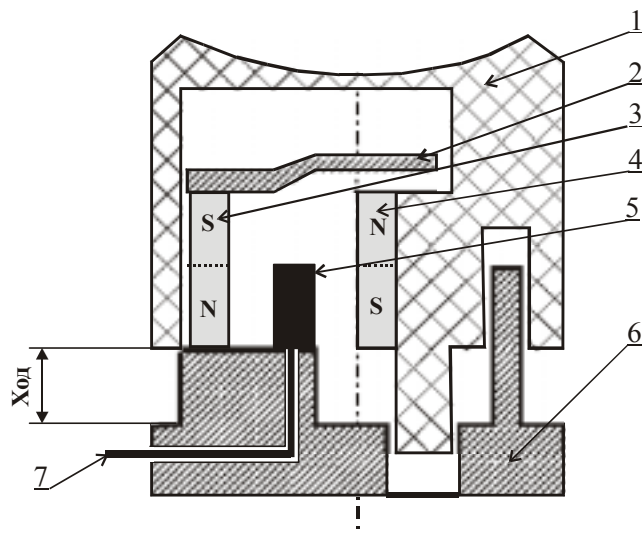


Рис. 6.13. Конструкция бесконтактного клавишного модуля с беспружинным возвратом, выполненная с использованием магнитоуправляемой микросхемы: 1 – головка модуля; 2 – полюсной наконечник; 3 – подвижный постоянный магнит; 4 – неподвижный постоянный магнит; 5 – магнитоуправляемая интегральная схема; 6 – основание-корпус модуля; 7 – выводы микросхемы

В такой конструкции (рис. 6.13) применяется магнитоуправляемая микросхема с инверсной характеристикой переключения, которая при отсутствии магнитного поля соответствует положению «включено», а при воздействии магнитного поля – положению «выключено».

Принцип действия такого клавишного модуля достаточно прост. При нажатии на головку модуля 1 подвижный магнит 3 пойдет вниз и встанет напротив зафиксированного магнита 4. Поскольку их полярность противоположна, то результирующее магнитное поле в зазоре будет равно 0. В этот момент происходит срабатывание микросхемы 7 и ее выходной сигнал будет соответствовать состоянию «включено». Если головку модуля отпустить, подвижный магнит 3 оттолкнется от неподвижного магнита 4, головка вернется в исходное положение и микросхема полем неподвижного магнита 4 будет приведена в первоначальное состояние – «выключено».

Сигнал на выходе МУМ представлен в стандартной форме в виде логического 1 или 0 и без дребезга, характерного для электромеханических систем. Схема легко согласуется с другими стандартными логическими элементами [19].

С расширением использования персональных компьютеров практически во всех отраслях обороны, науки и техники, в производстве и быту самым массовым потребителем бесконтактных клавишных модулей и блоков становятся производители ПЭВМ и периферийных устройств, так как мировое производство ПК достигло десятков миллионов комплектов в год.

Современные клавишные блоки (клавиатуры), применяемые в персональных компьютерах, характеризуются следующими параметрами:

- количество клавиш100–123;
- рабочий ход3,5–4,2 мм;
- усилие нажатия50–70 г;
- напряжение питания5В±10%;
- ток потребления200–50 мА (включая контроллер);
- ресурс работы (10–50) × 10⁶ циклов.

Зарубежными фирмами выпускается широкая номенклатура клавиатур, в том числе и устройства на магнитоуправляемых микросхемах.

В табл. 6.2 приведен перечень наиболее применяемых видов клавиатур для ПЭВМ и даны средние цены на них.

Несмотря на относительно высокие цены, фирма Honeywell (США) продолжает использовать магнитоуправляемые микросхемы в своих изделиях. Специалистами фирмы разработаны для этих целей два типа (2SSP, 2SSP-6) малогабаритных высокочувствительных схем с индукцией срабатывания/отпускания 1,5/1,1 мТл и –4/4 мТл.

Таблица 6.2. Перечень наиболее применяемых видов клавиатур для ПЭВМ и средние цены на них

№ п/п	Тип клавиатуры для ПЭВМ	Цена за 1 комплект в долларах США
1	На магнитоуправляемых интегральных	100...200
2	На герконах	80...150 (средняя)
3	Емкостная	5...70
4	Индуктивная	50...60
5	Электромеханическая	20...60
6	Мембранная	40...50
7	На токопроводящей резине	20...30

Фирма Allegro специально для портативной клавиатуры разработала магнитоуправляемые интегральные микросхемы серии A3210. Эти схемы рассчитаны на напряжение питания 2,5–3,3 В при токе потребления менее 1 мА. При изготовлении микросхем применяются эпитанарная и КМОП технологии [54].

На основе новых МУМ фирма Honeywell выпускает унифицированные клавишные модули (Keyswitch Modules) серии SD16. Модули выпускаются в двух модификациях: трехвыводные (Three-Terminal SD Module) и четырехвыводные (Four-Terminal SD Module). С использованием модулей SD16 фирма Honeywell выпускает несколько серий специализированных клавиатур, в том числе: 63SD30-4 (Microcomputer-based Keyboard), 26SD1-2 (Point-of-Sale Keyboard) и 12SD/16SD (Numeric Keyboards) [70]. Основные технические характеристики клавишных модулей серии SD16 приводятся в главе 21.

Дальнейшее развитие рынка магнитоэлектронных бесконтактных клавишных модулей и блоков клавиатур сдерживается сравнительно высокой стоимостью МУМ и значительным (2–5 мА) током потребления микросхем в режиме ожидания. При наличии на одной панели до 123 клавиш указанные недостатки во многих случаях являются определяющими конкурентоспособность изделий.

Одновременно с разработкой специальных микромощных МУМ и миниатюрных достаточно мощных постоянных магнитов продолжают поиски и новых конструктивных решений, позволяющих снизить трудоемкость и стоимость изготовления самих клавиатур. На рис. 6.14 в упрощенном виде изображен один из таких вариантов.

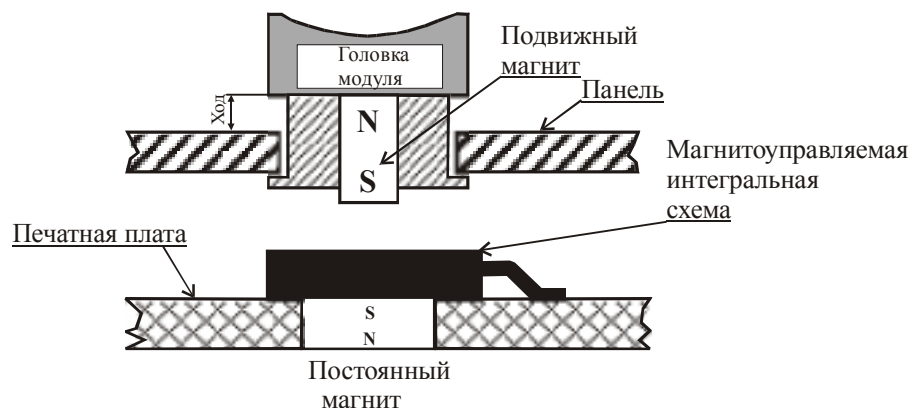


Рис. 6.14. Возможный вариант конструкции «группового» клавишного блока

В данной конструкции все магнитоуправляемые ИС блока размещаются на одной печатной плате вместе с контроллером клавиатуры. Под каждой микросхемой располагаются микромагниты. Подвижная часть клавиатуры представляет собой блок клавишных головок, размещенных на общей панели и тоже снабженных миниатюрными постоянными магнитами. Магниты на головке модуля и под микросхемой повернуты друг к другу одноименными полюсами, что позволяет использовать их в качестве возвратного механизма.

Совершенствование технологии изготовления МУМ с переходом на КНИ и КМОП процессы дает возможность снизить потребляемый ток до 0,1–0,25 мА в режиме ожидания при одновременном снижении стоимости микросхем до 10–15 центов за штуку, что способствует расширению сферы применения этих устройств.

6.3. Бесконтактные переменные резисторы

Особую группу магнитоэлектронных устройств представляют *бесконтактные переменные резисторы* (БПР). Эта группа электронных элементов с регулируемым сопротивлением по своему функциональному назначению примыкает к классу переменных резисторов – элементов современной электронной техники, предназначенных для регулировки напряжения и тока в электрических цепях.

Основным и принципиальным отличием БПР от других типов переменных резисторов является отсутствие подвижного контакта, перемещением которого по поверхности резистивного слоя обычно регулируется сопротивление или выходное напряжение данного устройства. В зависимости от схемы включения БПР часто называют бесконтактными потенциометрами (Non-contact Potentiometer).

Магнитоэлектронные БПР – это электронные компоненты, у которых регулирование сопротивления или выходного напряжения достигается воздействием на МЧЭ магнитного потока. В общем виде магнитоэлектронный БПР представляет собой устройство, состоящее из магниточувствительного элемента и связанного с ним источника управляющего магнитного поля. В необходимых случаях в конструкцию прибора встраивается электронная схема усиления и предварительной обработки сигнала.

Магнитоэлектронные переменные резисторы относятся к группе позиционных регуляторов, когда электрический режим управляющей цепи в процессе регулирования сопротивления остается неизменным, а интенсивность управляющего воздействия на магниточувствительный элемент изменяется путем изменения расположения МЧЭ относительно источника этого воздействия или промежуточных регулирующих элементов конструкции. При этом вращательное или поступательное движение подвижной системы БПР сопровождается изменением по определенному закону сопротивления МЧЭ или выходного напряжения.

Магнитоэлектронные переменные резисторы и потенциометры используются вместо традиционных переменных резисторов с подвижным контактом при необходимости обеспечения высокой разрешающей способности, малых шумов регулирования, высокой износоустойчивости и надежности.

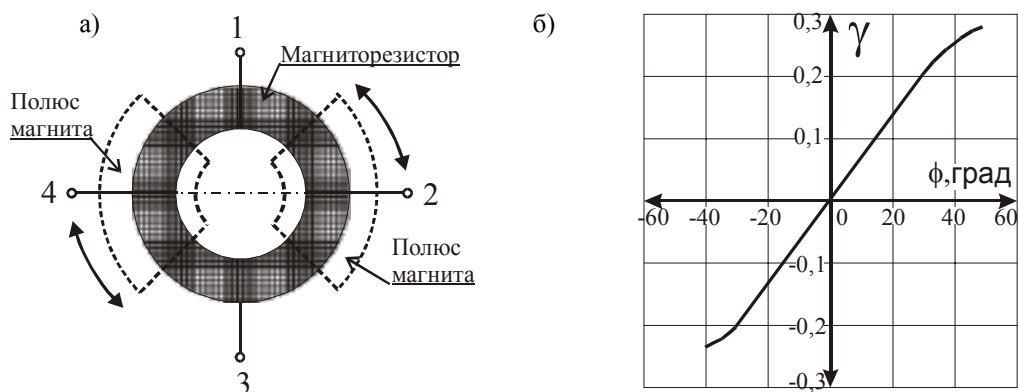


Рис. 6.15. Магнитоэлектронный потенциометр, реализованный с применением магниторезисторного моста: а – устройство; б – выходная характеристика: 1, 3 – выводы входа; 2, 4 – выводы выхода потенциометра; (γ – коэффициент деления потенциометра)

Принцип действия магнитоэлектронного потенциометра простейшей конструкции проиллюстрирован на рис. 6.15.а. В качестве управляемого элемента используется кольцевой магниторезистор с четырьмя сегментами, включенными в схему моста. Управляющее магнитное поле формируется специальным двухполюсным магнитом, жестко связанным с осью переменного резистора. При вращении магнита функциональная характеристика прибора может иметь вид, приведенный на рис. 6.15.б

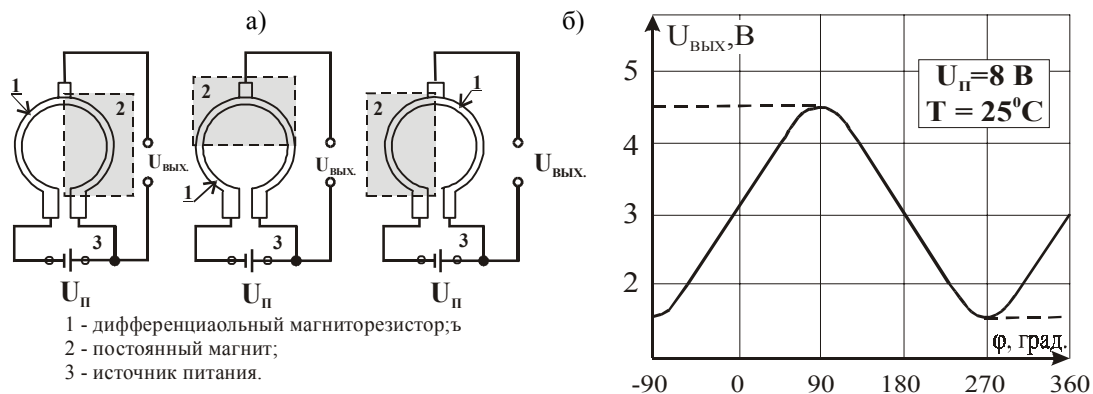


Рис. 6.16. Бесконтактный переменный резистор, выпускаемый фирмой Murata: а – устройство; б – выходная характеристика: 1 – дифференциальный магниторезистор; 2 – постоянный магнит; 3 – источник питания

На рис. 6.16. схематически показано устройство и принцип работы еще одного варианта бесконтактного переменного резистора, выпускаемого фирмой Murgata. В качестве управляемого элемента в этом приборе используется дифференциальный магнорезистор 1. Управляющее магнитное поле формируется специальным магнитом 2, жестко связанным с осью переменного резистора. При вращении магнита функциональная характеристика прибора имеет вид, показанный на рис. 6.16б.

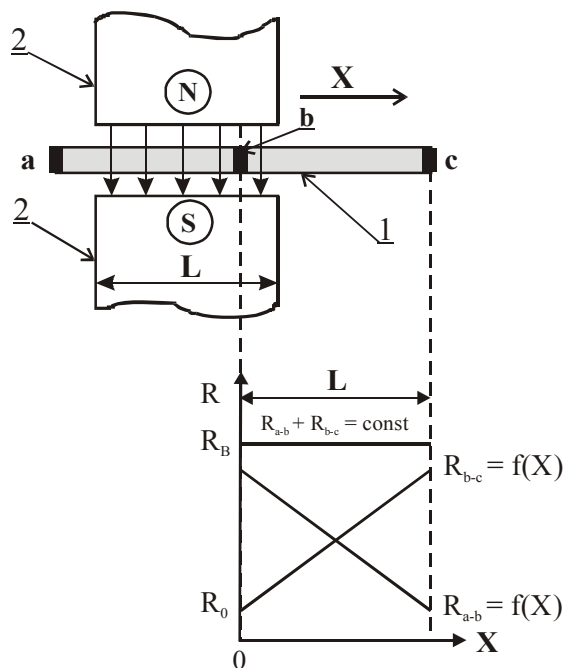


Рис. 6.17. Принцип действия переменного резистора с линейной характеристикой: 1 – дифференциальный магнорезистор; 2 – полюса постоянного магнита

Принцип работы магнитоуправляемого переменного резистора с линейной характеристикой поясняется на рис. 6.17, где дифференциальный магнорезистор 1 помещен в постоянное и однородное поле, создаваемое между полюсами постоянного магнита 2. Длина полюса магнита L равна длине одного плеча дифференциального магнорезистора. Если перемещать постоянный магнит в направлении X , то сопротивление левого плеча магнорезистора между точками a и b , то есть R_{a-b} , будет уменьшаться, так как не вся площадь его поверхности будет подвергнута действию магнитного поля.

В то же время сопротивление правого плеча магнорезистора R_{b-c} будет возрастать, так как все большая часть его поверхности будет подвергаться действию магнитного поля. Когда полюсы магнита окажутся в крайнем правом положении, R_{a-b} будет минимально, а R_{b-c} – максимально, при этом правое плечо магнорезистора окажется полностью в магнитном поле, а левое – полностью вне магнитного поля.

Если материал магниточувствительного элемента однородный, а его ширина и толщина постоянны, то изменения сопротивлений R_{a-b} и R_{b-c} от перемещения X имеют линейный характер. Отношение значений сопротивлений R_{a-b} и R_{b-c} в зависимости от перемещения полюсов X при $L > 0$ определяется следующим выражением [29]:

$$\frac{R_{a-b}}{R_{b-c}} = \left[\left(\frac{X}{L} + \frac{R_B}{R_0} \right) \times \left(\frac{1}{2} - \frac{X}{L} \right) \right] : \left[1 + \frac{R_B / R_0}{2} \right] \quad (6.1)$$

где R_0 – сопротивление плеча магнорезистора вне магнитного поля;

R_B – сопротивление плеча магнорезистора при воздействии магнитного поля.

Конструктивная реализация приведенного принципа построения шнекового бесконтактного переменного резистора показана на рис. 6.18.

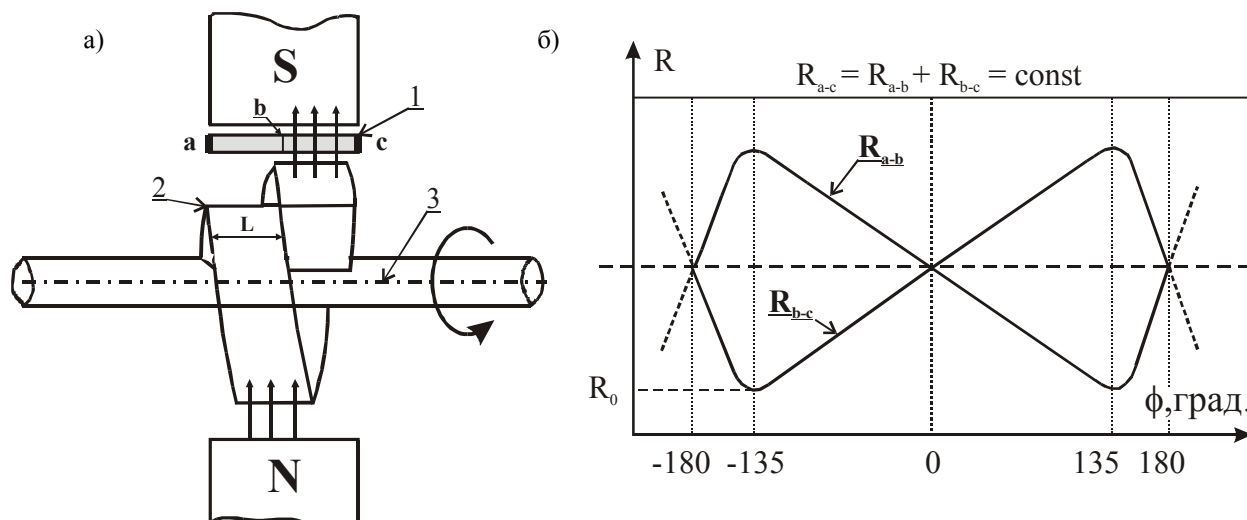


Рис. 6.18. Шнековый бесконтактный переменный резистор: а – магнитная система; б – характеристика: 1 – дифференциальный магнорезистор; 2 – управляющий шнековый магнитопровод; 3 – вал

В воздушном зазоре магнитной цепи (рис. 6.18.а) помещен дифференциальный магниторезистор 1. Управляющий магнитопровод 2 из ферромагнитного материала выполнен в виде одновиткового шнека, у которого ширина поверхности L равна длине одного плеча магниторезистора. При вращении вала 3 магнитный поток будет перемещаться от одного плеча магниторезистора к другому пропорционально углу поворота, то есть будет установлена линейная зависимость между углом поворота α и изменением сопротивления магниточувствительного элемента.

На рис. 6.18.б приведена зависимость изменения сопротивлений плеч R_{a-b} и R_{b-c} магниторезистора от угла поворота. Рабочий диапазон угла поворота равен $0-270^\circ$, причем сопротивление каждого плеча магниторезистора изменяется примерно от 15 до 85% суммарного значения этих сопротивлений. В принципе, можно придать вращающемуся магнитопроводу 2 такую форму, чтобы зависимость магнитного потока от угла поворота имела синусоидальный, трапецеидальный или логарифмический закон изменения сопротивления.

В некоторых случаях технического применения магнитоэлектронных бесконтактных переменных резисторов в качестве выходного параметра желательно иметь не сопротивление, а ток или напряжение. Тогда удастся избежать влияния изменения сопротивления подводящих проводов, а также снизить уровень помех. В таком случае могут использоваться бесконтактные резисторы с электронной схемой управления. Структурная схема бесконтактного переменного резистора с электронной схемой управления приведена на рис. 6.19.

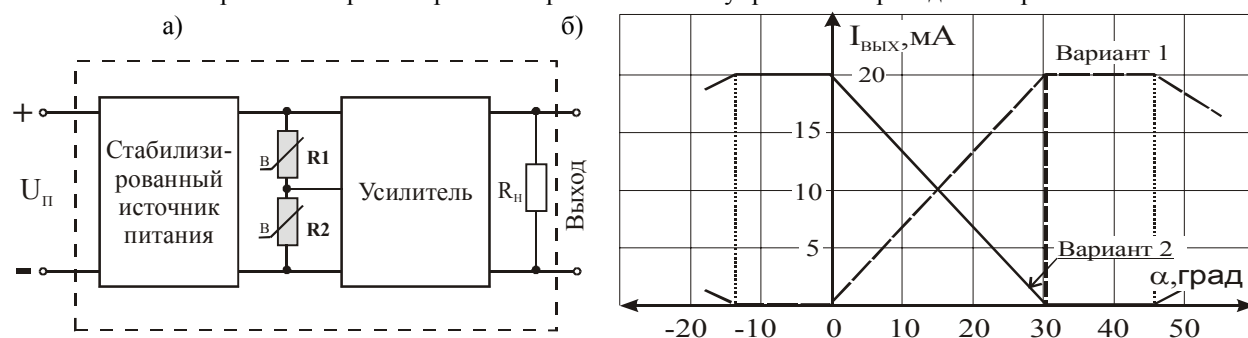


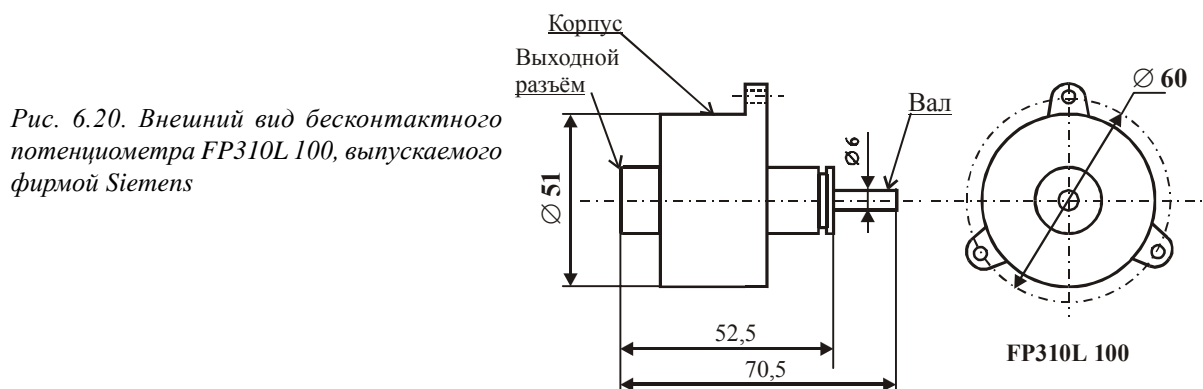
Рис. 6.19. Бесконтактный магнитоуправляемый резистор с электронной схемой управления: а – структурная схема; б – характеристика

Принцип действия бесконтактного переменного резистора с электронным управлением достаточно прост. Напряжение питания подается на стабилизатор напряжения, который питает управляемый элемент данного устройства (например, дифференциальный магниторезистор) постоянным напряжением. Напряжение, снимаемое с делителя, образуемого плечами магниторезистора, подается на вход операционного, или инструментального, усилителя, на выходе которого при вращении вала в рабочем диапазоне углов возникает токовый сигнал от 0 до 20 мА. По желанию за счет соответствующих переключений на выходе потенциометра можно получить выходную характеристику по варианту 1 или 2 (см. рис. 6.19).

Зарубежными фирмами выпускается широкая номенклатура магнитоэлектронных бесконтактных переменных резисторов и потенциометров. Ведущими производителями таких приборов являются фирмы Murata и Siemens.

Потенциометры фирмы Siemens снабжены шариковыми подшипниками, благодаря чему требуемый момент вращения в зависимости от вида уплотнения выходного вала лежит в пределах от 0,5 до 2 Н×см. Вал потенциометра не имеет механического ограничителя, то есть может непрерывно вращаться (допустимая частота вращения до 3000 об/мин, при этом гарантируется 100 млн. циклов работы). Усредненные габариты потенциометров с усилителями: длина (включая вал) – 80 мм, диаметр – 60 мм, масса – до 150 г.

На рис. 6.20 показан внешний вид магнитоэлектронного бесконтактного потенциометра типа FP310L 100, выпускаемого фирмой Siemens.



Магнитоэлектронные потенциометры при отсчете значения угла не имеют неточностей, связанных со скачками изменения сопротивления, как это бывает в обычных проволочных сопротивлениях. Отсутствие трущегося токосъемника снижает необходимый для поворота вала вращающий момент, исключает возможность искрообразования и предотвращает быстрый механический износ.

Эти свойства делают весьма эффективным использование бесконтактных потенциометров в качестве задачиков исходных величин в устройствах управления, аналоговых решающих устройствах, устройствах автоматического контроля, различного рода датчиках угла поворота, положения и т.п. [29, 31, 59, 62, 63, 64].

Основные параметры и внешний вид магнитоэлектронных бесконтактных переменных резисторов, выпускаемых фирмами Murata, Siemens и др., приводятся в главе 22 тома 2.

6.4. МЭУ для определения направления вектора магнитного поля

Магнитоэлектронные устройства для *определения направления вектора магнитной индукции* используются в различных отраслях науки и техники. Однако наибольшее распространение такие устройства получили при создании различных приборов, предназначенных для регистрации магнитного поля Земли (МПЗ) и ориентирования различной аппаратуры на плоскости и в пространстве относительно направления МПЗ.

Для понимания принципов ориентирования по магнитному полю Земли ниже приведем некоторые основные понятия.

Магнитное поле Земли

Его часто называют и *геомагнитным* (ГМП). Магнитное поле Земли (МПЗ) в каждой точке пространства характеризуется вектором напряженности T , направление которого определяется тремя составляющими X , Y , Z – северной, восточной и вертикальной составляющей – в прямоугольной системе координат (рис. 6.21.а) или тремя элементами Земли: горизонтальной составляющей напряженности H , магнитным склонением D (угол между H и плоскостью географического меридиана) и магнитным наклонением I (угол между T и плоскостью горизонта).

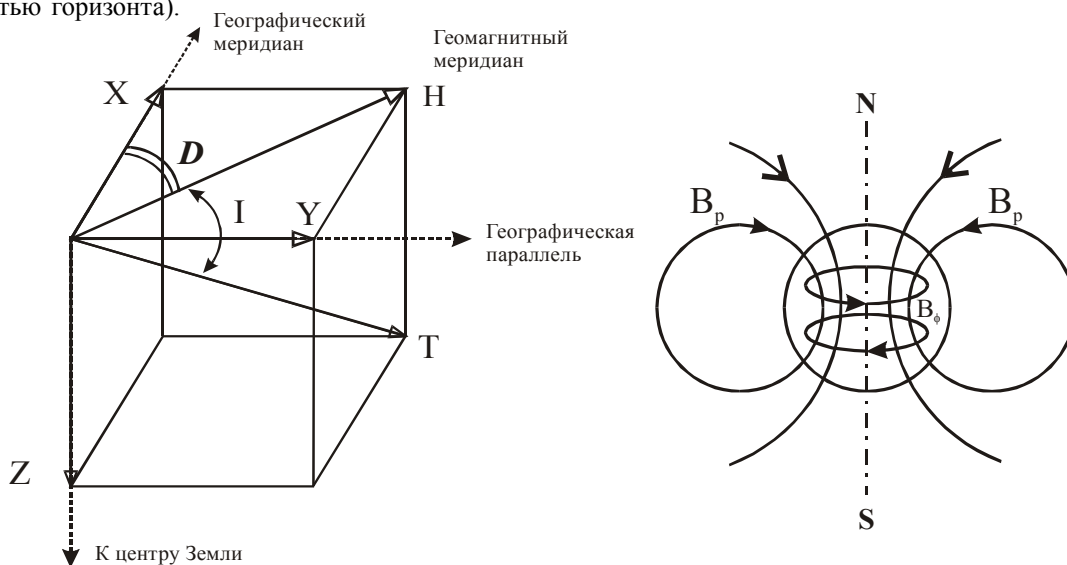


Рис. 6.21. Составляющие магнитного поля Земли

Земной магнетизм обусловлен действием постоянных источников, расположенных внутри Земли и испытывающих лишь медленные вековые изменения (вариации), и внешних – переменных – источников, расположенных в магнитосфере Земли и ионосфере.

Соответственно различают основное постоянное (~90%) и переменное (порядка 1%) геомагнитные поля.

Основное постоянное геомагнитное поле.

Для изучения пространственного распределения основного геомагнитного поля измеренные в разных местах значения H , D , I наносят на специальные карты, которые называются магнитными картами Земли, и соединяют линиями точки равных значений элементов [12, 15, 25]. Такие линии называют соответственно *изодинамами*, *изогонами*, *изоклинами*.

Линия изоклина $I = 0$, то есть магнитный экватор, не совпадает с географическим экватором. С увеличением широты значение I возрастает до 90° в магнитных полюсах. Полная напряженность T от экватора к полюсу растет от 33,4 до 55,7 А/м (от 0,42 до 0,7 э или от 42 до 70 мкТл).

Координаты северного магнитного полюса, (например, на 1970 год): долгота – $101,5^\circ$ западной долготы, широта – $75,7^\circ$ северной широты; южного магнитного полюса: долгота – $140,3^\circ$ восточной долготы, широта – $65,5^\circ$ южной широты.

Сложную картину распределения геомагнитного поля в первом приближении можно представить полем диполя (эксцентричного, со смещением от центра Земли приблизительно на 436 км) или однородного намагниченного шара, магнитный момент которого направлен под углом $11,5^\circ$ к оси вращения Земли.

Полюсы геомагнитные – полюсы однородно намагниченного шара – и полюсы магнитные задают соответственно систему геомагнитных координат (широта геомагнитная, меридиан геомагнитный, экватор геомагнитный) и магнитных координат (широта магнитная, меридиан магнитный).

Следует отметить, что понятия *северный магнитный полюс* и *северный магнетизм*, *южный магнитный полюс* и *южный магнетизм* не совпадают. Северный магнитный полюс Земли включает понятие южного магнетизма, а южный магнитный полюс – северного. (Подробнее см. [12, 25].)

Магнитные аномалии

Отклонения действительного распределения геомагнитного поля от дипольного (нормального) называют магнитными аномалиями.

Материковое магнитное поле Земли имеет среднюю напряженность H около 0,45 э. Однако на земном шаре существуют области магнитных аномалий, где напряженность магнитного поля может превышать среднюю в 2–3 раза. Обычно сильные магнитные аномалии связываются с залежами магнетитовых (FeO , Fe_2O_3) и титаномагнетитовых (примеси TiO_2) руд, с залежами других пород, обогащенных магнетитом, с некоторыми пирроктиловыми (FeS) месторождениями. Примерами таких аномалий являются Кривой Рог, Кольские аномалии, аномалии на Урале и т.п.

Наиболее сильной аномалией на земном шаре является аномалия в районе г. Курска и Белгорода, получившая наименование Курской магнитной аномалии (КМА). Напряженность поля КМА (вертикальная составляющая) достигает здесь 1,5–1,91 э. Эта аномалия объясняется наличием большого рудного тела под поверхностью Земли.

Практическое использование явления земного магнетизма

Известным примером использования явления земного магнетизма является изобретение компаса. Простейший компас представляет собой круглую коробку из немагнитного материала, в центре которой на остром основании (например, на игле) установлена магнитная стрелка. Она располагается в плоскости магнитного меридиана в направлении север–юг. Точность определения направления простым компасом составляет 2–5°. Точность показаний современных судовых магнитных компасов в средних широтах и при отсутствии качки достигает 0,3–0,5° [15].

К недостаткам магнитного компаса относится необходимость внесения поправки в его показания на несовпадение магнитного и географического меридианов (необходимость учитывать магнитное склонение) и поправки на девиацию – вращение Земли. Вблизи магнитных полюсов Земли и крупных магнитных аномалий точность показаний магнитного компаса резко снижается, в этих районах приходится пользоваться компасами других типов.

Однако ни один из известных компасов (магнитный, радиокompас, радиополукомпас, гирокомпас, гирополукомпас и т.п.) не могут обеспечить точного определения азимута во всех районах Земли при любой погоде, различных состояниях магнитосферы и радиопомехах. В связи с этим в морском и военном деле, в авиации применяют совместно компасы различных типов, на основе которых создают единые, комплексные, курсовые системы. Следует, однако, отметить, что точное определение положения объектов на поверхности Земли и в пространстве представляет собой сложную техническую задачу, которая решается при помощи магнитометрических систем контроля пространственного положения (МСКПП) с учетом многих факторов [9].

Другим важным направлением использования явления земного магнетизма является поиск и обнаружение полезных ископаемых, в первую очередь, железной руды по аномалиям магнитного поля Земли.

В данной главе будут рассмотрены простые устройства, предназначенные для определения направления вектора магнитной индукции с точностью, достаточной для практического непрофессионального применения.

6.4.1. Принципы определения направления вектора магнитного поля Земли

На практике определение направления вектора магнитного поля Земли H сводится к измерению напряженности двух его составляющих H_x и H_y (рис. 6.22) с дальнейшим вычислением угла ϕ .

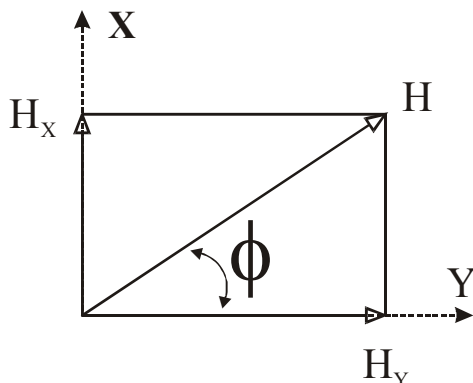


Рис. 6.22. Разложение вектора магнитного поля Земли на составляющие

Угол ϕ в этом случае определяется по формуле:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{H_y}{H_x} = \frac{H \times \sin \varphi}{H \times \cos \varphi} \quad (6.2)$$

Следует отметить, что значения напряженности магнитного поля, определенные датчиком МП, могут колебаться как по амплитуде ΔH и по постоянной составляющей H_{y0} и H_{x0} .

С учетом этого уравнение (6.2) принимает следующий вид:

$$\operatorname{tg} \phi^* = \frac{H \times \sin \varphi + H_{y0}}{(H + \Delta H) \times \cos \varphi + H_{x0}} = \frac{\sin \varphi + \frac{H_{y0}}{H}}{(1 + \frac{\Delta H}{H}) \times \cos \varphi + \frac{H_{x0}}{H}} \quad (6.3)$$

Как правило, для определения ориентации на плоскости используют не менее двух преобразователей магнитного поля. При этом их магниточувствительные элементы располагаются перпендикулярно друг к другу. Один датчик МП регистрирует H_x , другой – H_y .

Так как абсолютные значения синуса и косинуса угла ϕ^* равны при 45° , то вычисления производят только в этой области. Если предположить, что погрешность измерения H составляет 1%, то при угле 45° получают максимальное отклонение $1,1^\circ$ [75]. Этот угол может быть больше, чем ошибка стрелочного компаса. Для достижения необходимой точности при определении направления менее 1% в работе [75] были сформулированы следующие требования к измерительной системе, предназначенной для определения вектора МПЗ:

- отклонение амплитуды смещения не должно превышать 1% от максимального значения;
- диапазон измерений должен составлять от 20 до 100 А/м (от 0,25 до 1,25 Гс или от 0,025 до 0,125 мТл);
- один датчик должен определять только одну составляющую поля в направлении измерения.

Приборы, создаваемые для таких целей, часто называют *ориентационными датчиками*.

6.4.2. Выбор преобразователя магнитного поля

При разработке аппаратуры и приборов для определения параметров магнитного поля Земли большое значение имеет выбор типа преобразователя магнитного поля.

Для измерения параметров МПЗ наиболее широко используются такие ПМП, как тонкопленочные магниторезисторы, высокочувствительные элементы Холла, магнитоиндуктивные датчики и миниатюрные феррозонды (см. рис. 6.23). Основные параметры и характеристики указанных преобразователей приведены в главах 2 и 10. Ниже будут рассмотрены только те типы ПМП, которые специально предназначаются для определения параметров МПЗ и использования в навигационной аппаратуре и приборах.

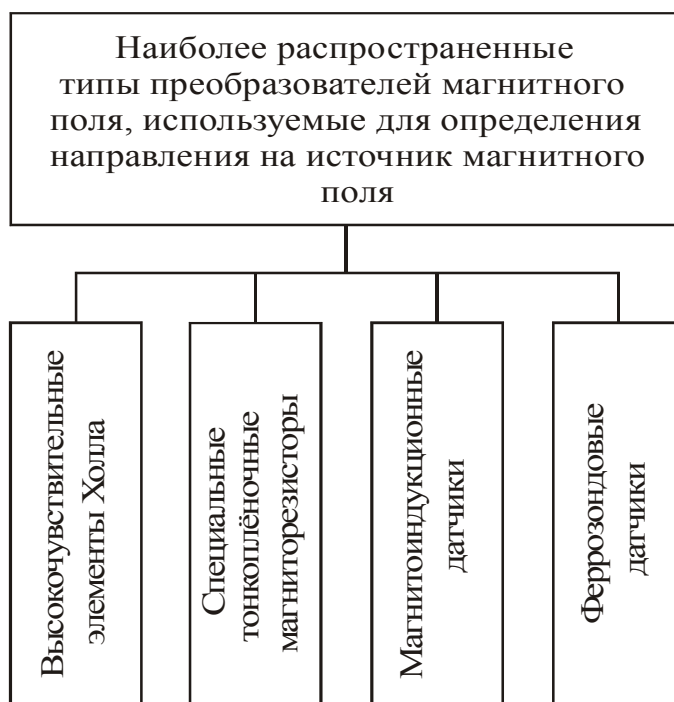


Рис. 6.23. Наиболее распространенные типы преобразователей магнитного поля, используемых для определения параметров магнитного поля Земли

В табл. 6.3 приведены сравнительные параметры и характеристики преобразователей магнитного поля, применяемых для определения параметров магнитного поля Земли.

Выбор типа ПМП осуществляется с учетом требуемых параметров и характеристик разрабатываемой аппаратуры, условий ее эксплуатации и целого ряда экономических факторов. Основное требование, предъявляемое к ПМП, предназначенным для этих целей, – это высокая и явно выраженная координатная магнитная чувствительность. При выборе ПМП особое внимание должно уделяться изучению их ориентационных характеристик (см. главу 2).

Таблица 6.3. Основные параметры наиболее распространенных преобразователей магнитного поля, используемых для регистрации магнитного поля Земли

№ п/п	Тип преобразователя магнитного поля	Основные параметры				Достоинства, недостатки, особенности применения
		Минимальное разрешение, мкТл	Число одновременно регистрируемых составляющих МП	Динамический диапазон, мТл	Потребляемая мощность, мВт	
1	Элемент Холла (высокой чувствительности)	1...10	1...3	± 100	10...50	Компактность, высокая надежность, широкий динамический диапазон. Удовлетворительная магнитная чувствительность. Малая постоянная времени. Хорошая ориентационная характеристика. Хорошее сопряжение с электроникой. Широкий диапазон рабочих температур от -260 до +150°C. Высокая стоимость.
2	Специализированный тонкопленочный магниторезистор	0,4...0,85	1...2	$\pm (0,2...1)$	30...90	Компактность и высокая надежность. Высокая магнитная чувствительность. Интегральная технология, совмещенная с компенсационной и модулирующей катушками. Малая постоянная времени. Хорошая ориентационная характеристика. Хорошее сопряжение с электроникой. Диапазон рабочих температур от -40 до +85°C. Ограниченный динамический диапазон Сравнительно низкая стоимость
3	Магнитоиндукционный датчик	0,01...0,02	1	$\pm (1...200)$	1...5	Компактность и высокая надежность. Высокая магнитная чувствительность. Малая постоянная времени. Хорошее сопряжение с электроникой. Хорошая ориентационная характеристика. Диапазон рабочих температур от -20 до +70°C. Ограниченный динамический диапазон Низкая стоимость
4	Феррозонд	0,0001...0,01	1	$\pm 0,1$	5...50	Очень высокая магнитная чувствительность. Удовлетворительная ориентационная характеристика. Сравнительно большие размеры. Ограниченный динамический диапазон. Невысокая механическая прочность, невозможность работы в условиях вибраций и тряски. Значительная инерционность. Сложность сопряжения с электроникой. Диапазон рабочих температур от -10 до +70°C. Значительная трудоемкость и высокая стоимость

6.4.3. Магнитные датчики на основе тонкопленочных магниторезисторов

Для определения параметров магнитного поля Земли и определения вектора направления магнитной индукции наибольшее распространение получили специализированные типы тонкопленочных магниторезисторов (см. главы 2 и 10. т.2).

Магниторезисторные мосты серии KMZ10

Тонкопленочные магниторезисторные мосты серии KMZ10 выпускаются несколькими зарубежными фирмами. Они характеризуются высокими магнитоэлектрическими параметрами при сравнительно невысокой стоимости.

Преобразователь магнитного поля типа KMZ10 состоит из четырех тонкопленочных магниторезисторов, расположенных на одной кремниевой подложке и соединенных в мостовую схему (рис. 6.24).

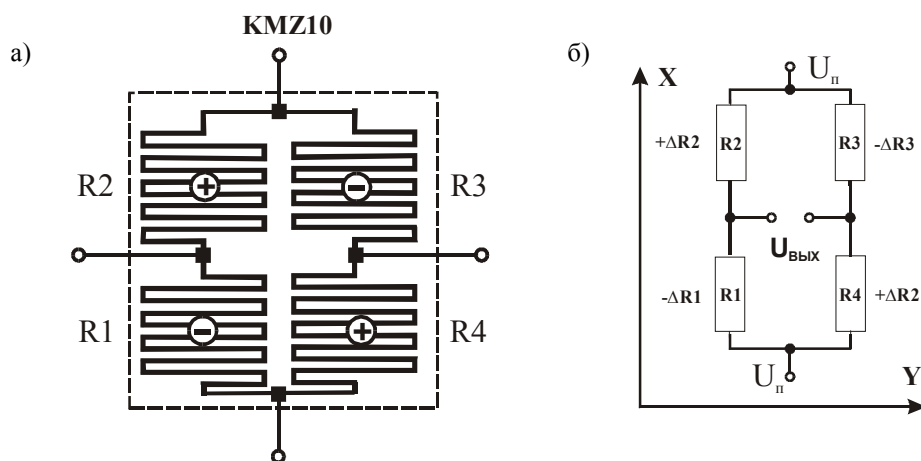


Рис. 6.24. Магниторезисторный мост типа KMZ10: а – расположение магниточувствительных элементов; б – электрическая схема

Относительная магнитная чувствительность магниторезисторных мостов серии KMZ10, выпускаемых фирмой Philips, составляет 1–27 (мкВ/В)/(А/м); напряжение питания датчика – 5–10 В при токе потребления не более 10 мА.

Датчик размещается в стандартном пластмассовом корпусе габаритами 5,2×4,8×1,8 мм. Диапазон рабочих температур для датчиков серии KMZ10 составляет от –40 до +150 °С [32]. Основные параметры и характеристики мостов KMZ10 приведены в главе 10 тома 2.

Все включенные в мост магниторезисторы активны, а изменения их сопротивлений в смежных плечах противоположны по знаку при воздействии магнитного поля одной полярности (рис. 6.24б). При этом изменение сопротивления плеч зависит как от значения и полярности индукции воздействующего поля, так и от угла между вектором индукции и плоскостью магниточувствительного элемента. Преобразователь обладает координатной чувствительностью относительно плоскостей X и Y.

Следует, однако, учитывать, что за счет воздействия внешнего «сильного» поля в X направлении навигационный пеленг (азимут) может изменять полярность для всех магниторезисторов, что приводит к перемене знака выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ мостовой схемы. Если это поле сохраняется в процессе измерения, то оно ухудшает чувствительность прибора.

Кроме того, так как сопротивления магниторезисторов нельзя точно подогнать при изготовлении, то необходимо учитывать и напряжение смещения $U_{\text{вых «0»}}$ величина которого, как правило, гораздо больше, чем ожидаемое регистрируемое напряжение. Все эти параметры датчика имеют значительный разброс и сильно зависят от температуры.

При проектировании аппаратуры эти источники погрешностей могут быть устранены различными способами. Некоторые из них будут рассмотрены в настоящей главе.

Тонкопленочные магниторезисторы серии Micromag

Фирма Space Electronics (США) разработала интегральный магнитный датчик типа MMS101 (Micromag), предназначенный для использования в высокочувствительных магнитометрах и навигационных приборах. Устройство этого датчика показано на рис. 6.25, а на рис. 6.26 приведена его электрическая схема [41].

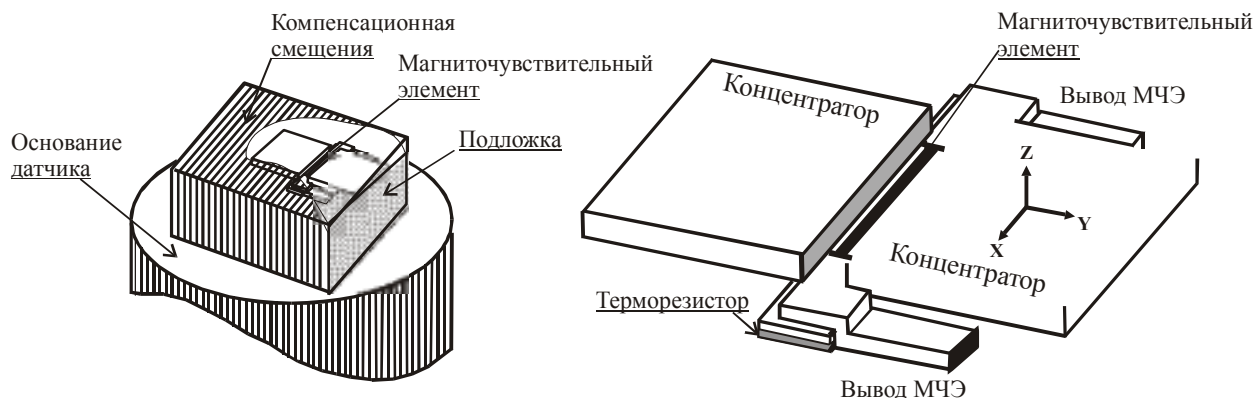


Рис. 6.25. Устройство датчика типа MMS101

В качестве магниточувствительного элемента датчика типа MMS101 использован тонкопленочный магниторезистор. Для повышения координатной чувствительности прибора МЧЭ снабжен двумя миниатюрными концентраторами магнитного поля, состоящими из двух пермаллоевых полосок. В непосредственной близости от МЧЭ размещается миниатюрный терморезистор, имеющий ТКС, обратный по знаку температурному коэффициенту МЧЭ. Магниточувствительный элемент вместе с концентратором и терморезистором размещаются внутри микроминиатюрной катушки, обеспечивающей компенсацию «паразитного» магнитного поля.

Порог чувствительности магниторезисторов серии MMS101 составляет 0,135 нТл при отношении сигнал/шум, равном 1. Напряжение питания датчика – 1–2,5 В при токе потребления не более 8 мА. Датчик размещается в пластмассовом корпусе типа DIP-14 габаритами 7,8×21,1×4,3 мм. Диапазон рабочих температур для датчика находится в пределах от –25 до +100 °С.

Основные параметры и характеристики магниторезисторов серии MMS101 приведены в главе 24 тома 2.

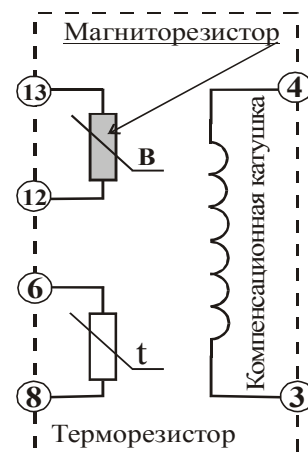


Рис. 6.26. Электрическая схема прибора типа MMS101 (Micromag)

Магниторезисторные микросхемы серии НМС

Фирмой Honeywell выпускается серия НМС гибридных магниторезисторных микросхем, предназначенных для использования в навигационной аппаратуре. В состав серии входят несколько типов изделий: НМС 1001, НМС 1002, НМС 1021, НМС 1022, НМС 2002 и НМС 2003. Основные параметры и характеристики приборов данной серии приведены в главе 24 [56, 67, 73, 74].

На рис. 6.27 приведена топология магниторезисторного моста серии НМС. Основу этих приборов составляет тонкопленочный магниторезисторный мост, напыленный на кремниевую подложку. На этой же подложке размещены две тонкопленочные катушки. Одна из них $L_{\text{КОМ}}$ предназначена для компенсации «паразитного» магнитного поля и выбора рабочей точки моста, другая $L_{\text{СМ}}$ – для модуляции сигнала (см. рис. 6.27). Все устройство размещается в стандартном пластмассовом корпусе ИС.

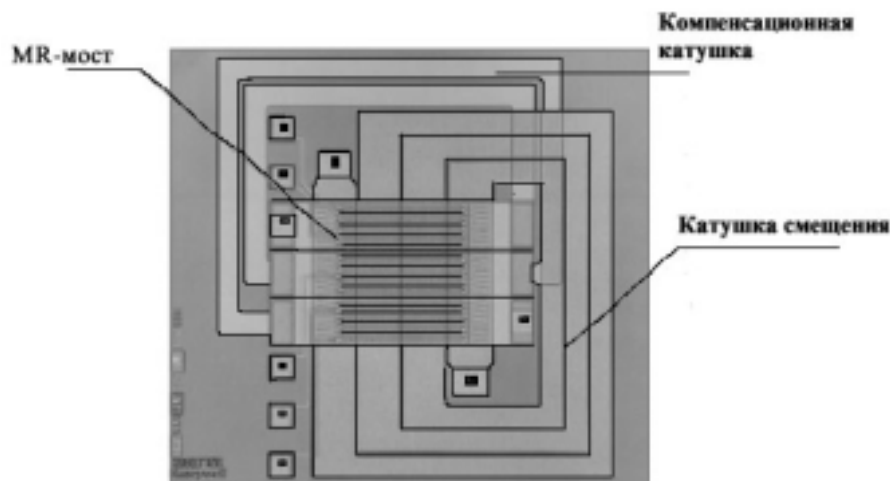


Рис. 6.27. Топология магниторезисторного моста серии НМС

Приборы НМС 1001, НМС 1002, НМС 1021, НМС 1022, НМС 2002, НМС 2003 отличаются количеством элементов в одном корпусе и уровнем магнитоэлектрических параметров. Основные параметры и характеристики магниторезисторов серии НМС приведены в главе 24.

Магнитная чувствительность магниторезисторных микросхем серии НМС составляет 10–30 (мВ/В)/мТл. Напряжение питания датчика – 1–12 В при токе потребления не более 10 мА. Датчики размещаются в пластмассовых корпусах с габаритами от 5×4×1,8 до 7,8×21,1×4,3 мм. Диапазон рабочих температур для датчиков находится в пределах от –40...+85 до –55...+125 °С.

б)

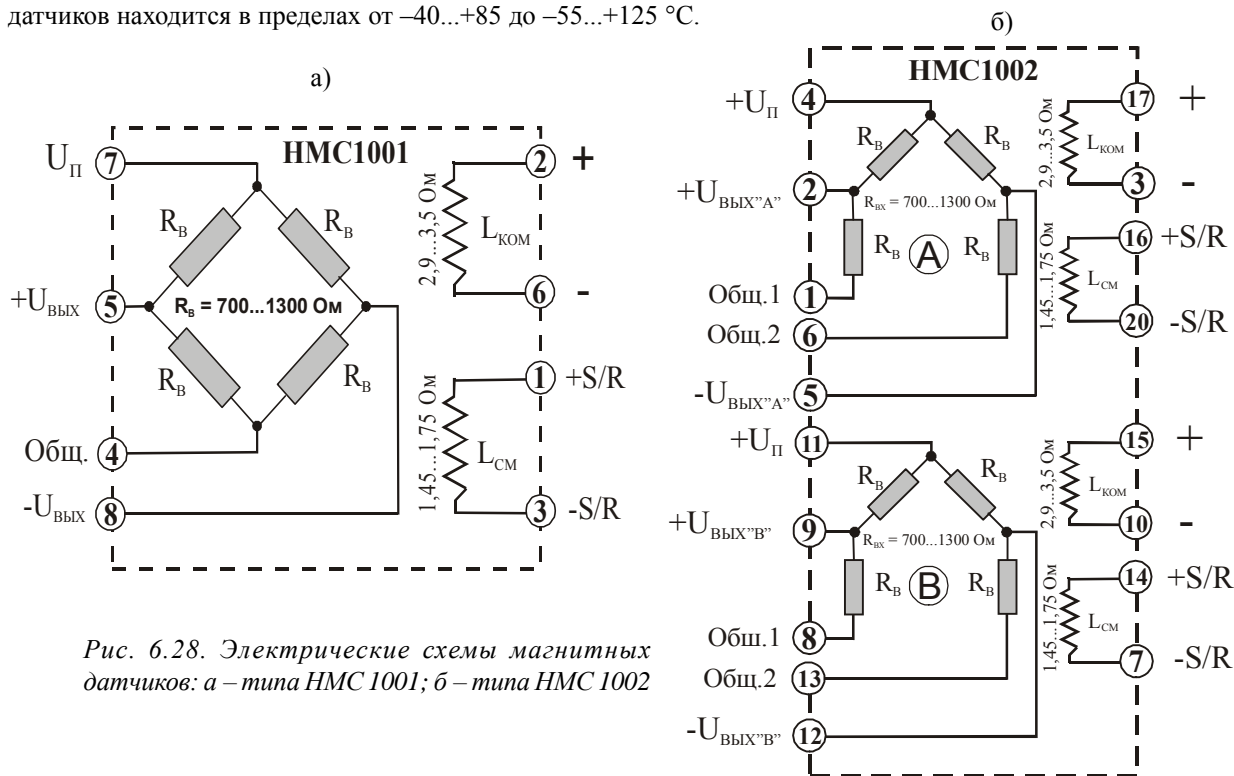


Рис. 6.28. Электрические схемы магнитных датчиков: а – типа НМС 1001; б – типа НМС 1002

На рис. 6.28.а приведена электрическая схема датчика типа НМС 1001. Он предназначен для регистрации магнитного поля, направленного вдоль одной оси (X или Y). Датчик содержит один магниторезисторный мост и две катушки. Одна из них предназначена для компенсации «паразитного» магнитного поля и выбора рабочей точки, другая – для модуляции сигнала. Вся конструкция размещается в стандартном пластмассовом корпусе типа SIP-8 с максимальными габаритами 10,3×7,5×2,4 мм.

На рис. 6.28.б приведена электрическая схема датчика типа НМС 1002, который отличается тем, что в нем размещается два комплекта тонкопленочных элементов, имеющих в приборе НМС 1001. Прибор позволяет производить регистрацию магнитного поля в двух взаимно перпендикулярных направлениях, по осям X и Y. Вся конструкция прибора НМС 1002 размещается в стандартном пластмассовом корпусе типа DIP-20 с максимальными габаритами 12,8×7,5×2,4 мм.

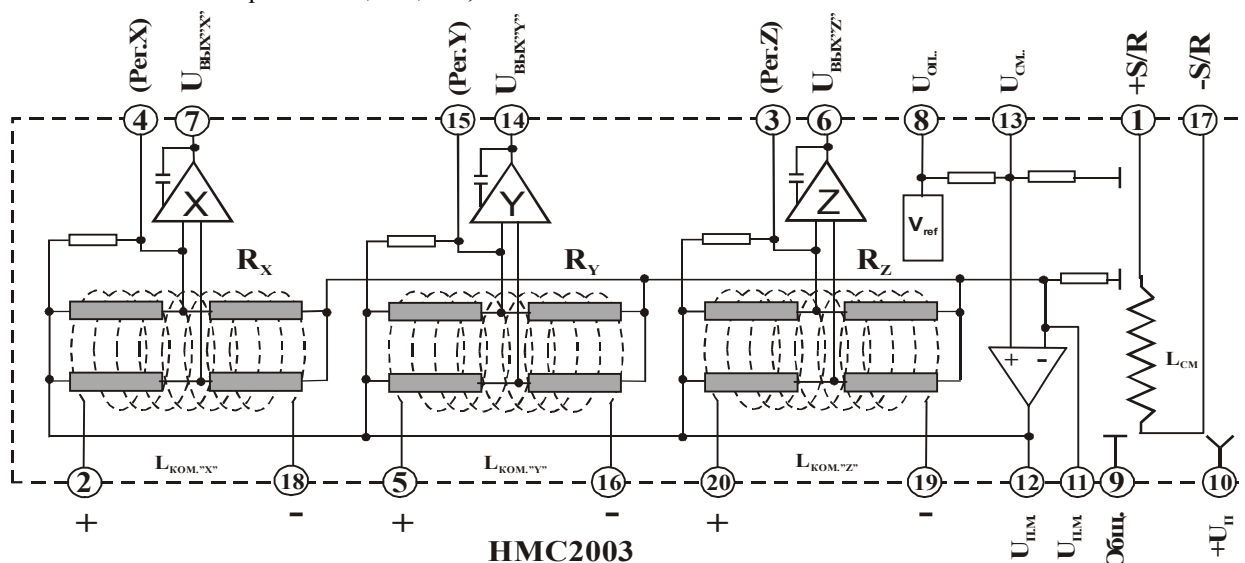


Рис. 6.29. Упрощенная электрическая схема магнитного датчика типа НМС 2003

На рис. 6.29 приведена упрощенная электрическая схема датчика типа НМС 2003. Магнитный датчик НМС 2003 является более сложным магнитоэлектронным устройством. В его конструкции, выполненной в виде гибридной микросхемы, размещаются по одному датчику типа НМС 1001 и НМС 1002 и четыре операционных усилителя, предназначенных для предварительного усиления сигнала. Этот прибор позволяет производить измерение магнитного поля в трех взаимно перпендикулярных направлениях, по осям X, Y, Z.

Внешний вид датчика НМС 2003 приведен на рис. 6.30. Все элементы прибора размещаются на миниатюрной керамической плате с максимальными габаритами 25,5×19,2×12,5 мм.

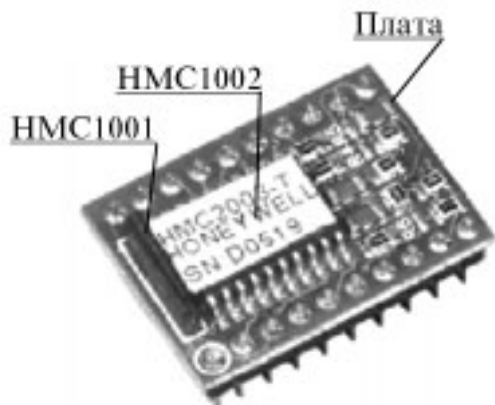


Рис. 6.30. Внешний вид датчика НМС 2003

Магнитный датчик НМС 2002 тоже выполнен в виде гибридной микросхемы. Он содержит два магниторезисторных моста и два комплекта операционных усилителей. Этот прибор предназначен для измерений параметров магнитного поля в трех взаимно перпендикулярных направлениях, по осям X, Y и Z.

6.4.4. Ориентационные датчики с применением магниторезисторов

Простейшие варианты устройств для определения вектора магнитного поля

На рис. 6.31 приведена схема простейшего магнитометра с использованием магниторезисторного датчика типа MMS101. Магнитометр имеет достаточно острую ориентационную характеристику[41].

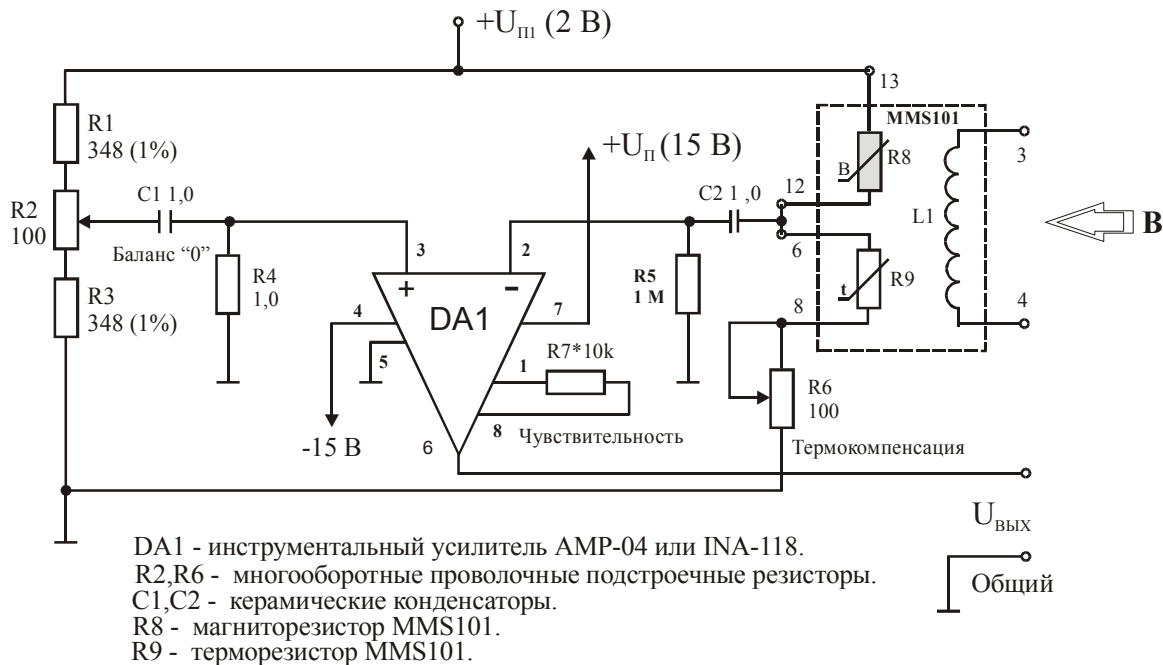


Рис. 6.31. Схема простейшего магнитометра на основе датчика MMS101, рекомендованная фирмой Space Electronics

В качестве основного активного элемента в схеме (рис. 6.31) использован маломощный инструментальный усилитель типа AMP-04, выпускаемый фирмой Analog Devices.

Магниторезистор R8 включен в мост, образованный резисторами R1, R2, R3, R6+R9. При этом терморезистор R9 служит для компенсации изменения сопротивления магниторезистора R8 при изменении температуры окружающей среды.

Сопротивление резистора R6 выбирается из следующего отношения:

$$R6 = \frac{(\alpha_{\text{ТД}} - \alpha_{\text{Д}})}{(\alpha_{\text{Д}} - \alpha_{\text{Р}})} \times R9 \quad (6.4)$$

где $\alpha_{\text{Д}}$ – температурный коэффициент магниторезистора R8 (0,24% на 1 °С);
 $\alpha_{\text{ТД}}$ – температурный коэффициент терморезистора R9 (0,3% на 1 °С);
 $\alpha_{\text{Р}}$ – температурный коэффициент резистора R6.

В качестве резисторов R2 и R6 используются проволочные многооборотные подстроечные резисторы типа СП5-3 (ТКС – 0,05% на 1 °С), а в качестве конденсаторов C1 и C2 – керамические конденсаторы с малым током утечки и малым ТКС. «Паразитное» магнитное поле компенсируется подачей соответствующего напряжения на катушку смещения (выводы 3, 4).

Вместо инструментального усилителя AMP-04 лучше использовать интегральную микросхему типа INA-118P, производимую фирмой Born Brawn. Этот усилитель отличается минимальным током потребления (менее 0,5 мА) и меньшим уровнем напряжения собственных шумов [21, 43, 57].

По утверждению фирмы Space Electronics, такой магнитометр регистрирует магнитные поля в диапазоне от 0,135 до 65×10³ нТл и может использоваться в навигационных приборах [41].

На рис. 6.32 приведена схема простейшего определителя направления на локальный источник магнитного поля. Определитель направления реализован с применением двух отечественных тонкопленочных магниторезисторов типа Ав-2, без концентратора [8].

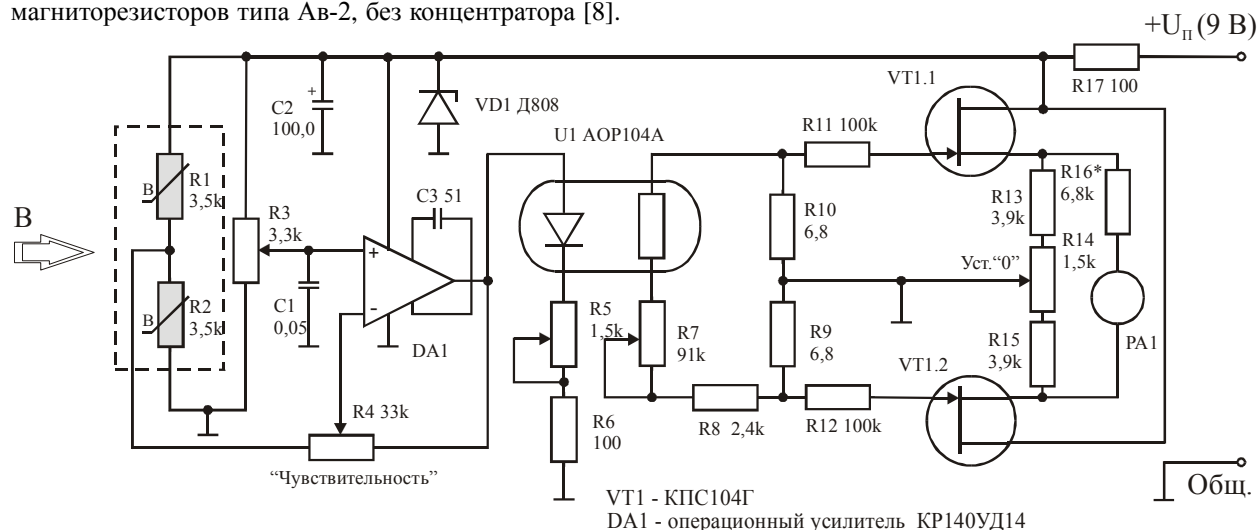
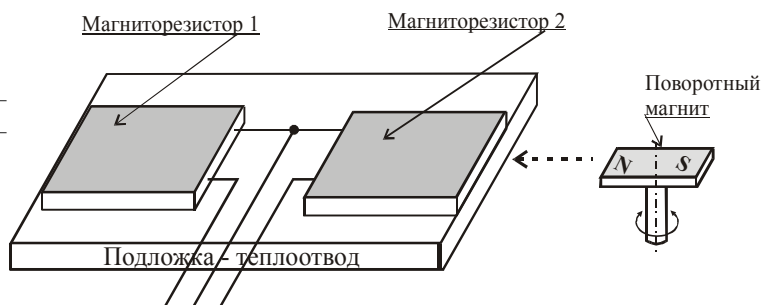


Рис. 6.32. Электрическая схема простейшего определителя направления на локальный источник магнитного поля, реализованного с применением тонкопленочного магниторезистора типа Ав-2

Датчик магнитного поля (рис. 6.33) состоит из двух магниторезисторов (R1, R2), размещенных на массивном (толщиной 5 мм) медном основании с целью компенсации быстрых изменений температуры и, следовательно, теплового дрейфа параметров МЧЭ.

Рис. 6.33. Датчик магнитного поля: а – схема размещения магниторезисторов; б – компенсирующий (поворотный) магнит



Вместе с подстроечным резистором R3 (рис. 6.32) датчик представляет собой измерительный мост постоянного тока. Резистор R3 служит для начальной балансировки моста. Точную магнитную балансировку моста выполняют поворотом миниатюрного постоянного магнита (рис. 6.33б), размещенного вблизи одного из магниторезисторов. Ручка поворота магнита выводится на лицевую панель устройства.

При изменении направления магнитного поля происходит разбаланс моста R1, R2, R3 и на его выходе появляется сигнал разбаланса, поступающий на вход операционного усилителя DA1. С выхода усилителя DA1 сигнал поступает на светодиод оптрона U1, что вызывает изменение сопротивления фоторезистора. Фоторезистор, в свою очередь, входит в состав второго моста, образованного резисторами R7–R10. Напряжение в диагонали этого моста измеряется транзисторным милливольтметром (VT1.1, VT1.2, PA1). Таким образом, показания микроамперметра PA1 регистрируют напряженность и направление магнитного поля.

Знак отклонения стрелки прибора соответствует знаку изменения полярности магнитного поля.

Применение оптрона U1 связано с тем, что в этом случае за счет гальванической развязки значительно упрощается процесс симметрирования выходного сигнала. До монтажа устройства снимается выходная характеристика оптрона с целью выявления линейного участка. Затем подстроечным резистором R5 устанавливается рабочая точка на середине линейного участка.

В качестве подстроечных резисторов R3, R5, R7, R14 использованы проволочные многооборотные потенциометры типа СП5-3. Переменным резистором R4 регулируют чувствительность устройства. Этот резистор спарен с выключателем питания, его ручка выведена на переднюю панель. Номинальное сопротивление резистора R16 подгоняют при выборе пределов измерения прибора. В качестве измерительного прибора PA1 применяется микроамперметр типа M247 с током полного отклонения 50–0–50 мкА.

Определитель направления питается от батареи типа «Крона». Он размещается в пластмассовом корпусе габаритами 85×70×30 мм. Масса прибора в не превышает 100 г.

Точность прибора невысока, но при его помощи можно демонстрировать принцип определения направления магнитного поля Земли. Этот прибор может использоваться и для обнаружения скрытой проводки.

Магнитную чувствительность описанного устройства можно значительно улучшить, если вместо дискретных магниторезисторов Ав-2 использовать тонкопленочный магниторезисторный мост из серии КМЗ10.

На рис. 6.34 приведена конструкция магнитного датчика направления с использованием моста типа КМЗ10. Мост размещается внутри компенсационной катушки и закрепляется в ней при помощи эпоксидного компаунда.

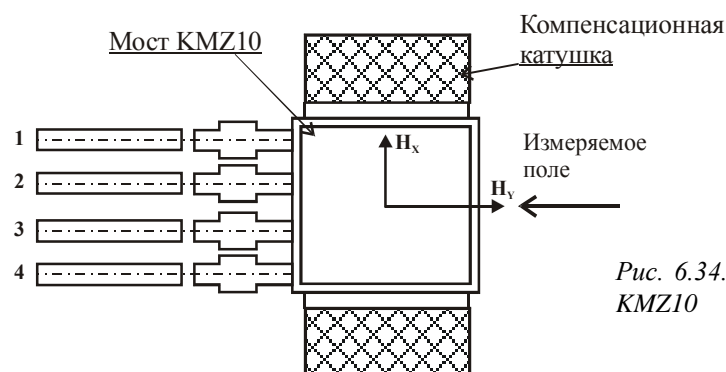


Рис. 6.34. Устройство магнитного датчика с мостом КМЗ10

Компенсационная катушка содержит 800–1000 витков провода диаметром 0,07–0,1 мм. Сопротивление катушки – 50–150 Ом. Питание катушки осуществляется от отдельного источника питания с напряжением ± 2 В. При этом принципиальная электрическая схема (рис. 6.32) прибора меняется незначительно. Магнитная балансировка прибора осуществляется в этом случае не постоянным магнитом, а переменным резистором R2.

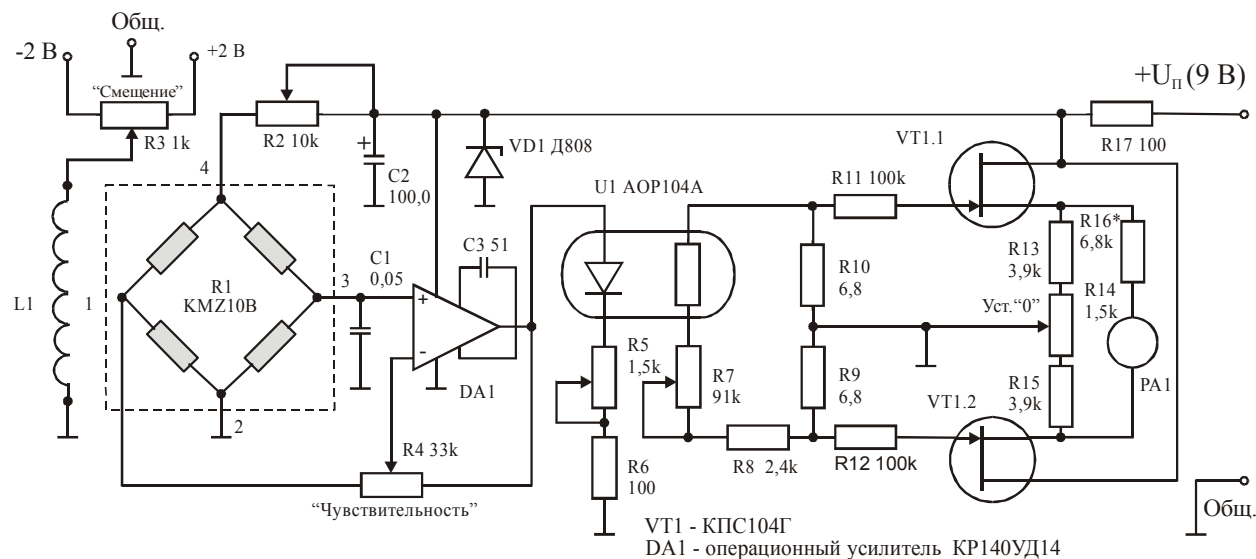


Рис. 6.35. Измененная электрическая схема простейшего определителя направления

Магнитная чувствительность измененного устройства (рис. 6.35) вполне достаточна для определения направления МПЗ по одной из осей – X или Y. Недостатком данного устройства является заметная зависимость основных параметров от изменения температуры окружающей среды.

6.4.5. Варианты устройств для определения вектора МП, реализованных с использованием принципа квазимодуляции

Сопротивление магниторезисторов, соединяемых в мостовую схему, нельзя точно подогнать при их изготовлении. Это вызывает увеличение начального напряжения смещения моста $U_{см0}$, величина которого, как правило, гораздо больше, чем ожидаемое регистрируемое напряжение. Все эти параметры датчика имеют значительный разброс и сильно зависят от температуры.

При проектировании навигационной аппаратуры эти источники погрешностей могут быть устранены различными способами. Одним из наиболее применяемых способов является *принцип квазимодуляции магнитного потока*, воздействующего на преобразователь магнитного поля. Для этого применяется вспомогательный источник магнитного поля, в качестве которого могут использоваться специальные катушки смещения, встраиваемые непосредственно в преобразователь магнитного поля или размещаемые снаружи ПМП.

Принцип квазимодуляции показан на рис. 6.36. Модуляция магнитного потока осуществляется путем подачи на вспомогательный источник магнитного поля импульсов тока различной полярности, что соответственно приводит к изменению полярности магнитного поля, воздействующего на ПМП.



Рис. 6.36. Иллюстрация принципа квазимодуляции

Примером технической реализации указанного принципа может служить конструкция магнитного датчика, приведенная на рис. 6.37. В данной конструкции магниторезисторный мост (например, КМЗ10) размещается внутри катушки смещения.

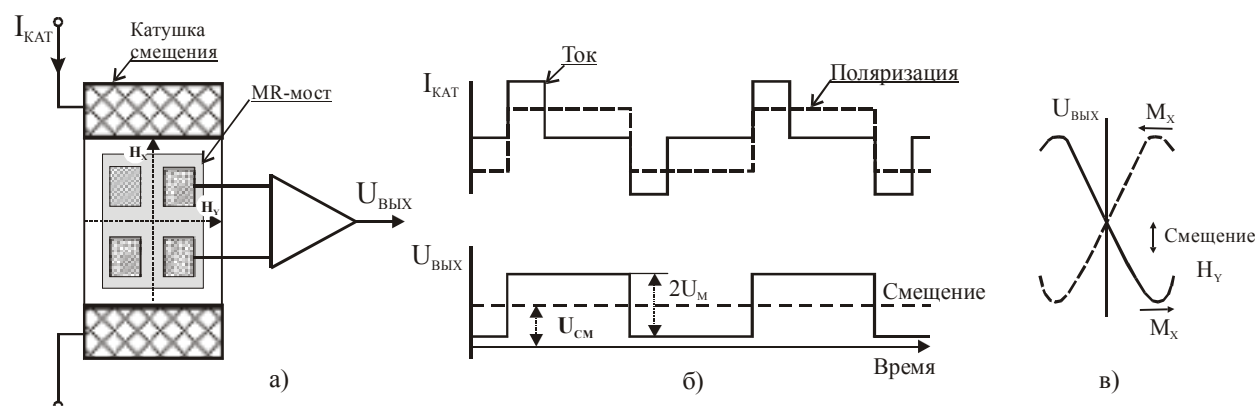


Рис. 6.37. Иллюстрация принципа действия датчика с квазимодуляцией магнитного потока: а – конструкция датчика; б – эюры тока через катушку смещения и напряжения на выходе датчика; в – напряжение на выходе MR моста

Принцип работы такого устройства можно объяснить следующим образом.

На обмотку катушки смещения подаются двухполярные импульсы тока прямоугольной формы, что приводит к воздействию на МЧЭ двухполярного магнитного поля и появлению соответствующих сигналов на выходе моста. Так как постоянная составляющая зависит только от напряжения питания моста, то она никакого воздействия не оказывает.

Измеряемое напряжение пульсирует (рис. 6.37б) и может изменять полярность. При помощи специальных схем фиксируют пиковые значения выходных сигналов, а затем эти значения вычитают друг из друга. Такая конструкция предполагает передачу и усиление постоянных напряжений.

Чтобы рабочий диапазон магнитоэлектронного устройства был достаточно большим, нужно регулировать усиление измерительного тракта в широких пределах. Технически возможно сконструировать два идентичных усилителя постоянного тока, но не удастся гарантировать одинаковые характеристики во всем рабочем диапазоне. Если оба сигнала проходят через один усилитель, то эту проблему можно решать путем *демодуляции*.

Демодуляция сигнала обычно осуществляется звеном, электрическая схема которого приведена на рис. 6.38.

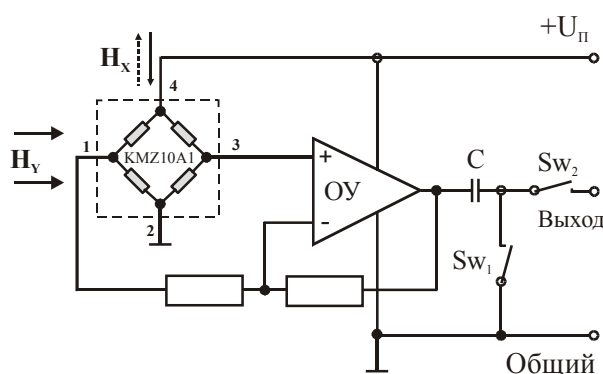


Рис. 6.38. Упрощенная схема компенсации напряжения смещения и демодуляции сигнала

Схема (рис. 6.38) работает следующим образом. При одном из полупериодов конденсатор C на выходе усилителя через ключ Sw_1 замыкается на корпус ОУ, при этом он перезаряжается на существующий потенциал. При переключении направления ключ Sw_1 размыкается, ключ Sw_2 замыкается и удвоенный сигнал $2U_M$ поступает на выход. Такая схема компенсирует колебания параметров узлов, в том числе начальное постоянное смещения $U_{см}$.

Так как динамический диапазон тонкопленочных магниторезисторов относительно мал, то часто возникает необходимость компенсации «паразитного» магнитного поля, величина индукции которого выходит за пределы динамического диапазона. Такая компенсация производится путем подачи постоянного напряжения определенной полярности непосредственно на катушку смещения.

Функциональная схема входного устройства для определения направления на источник магнитного поля с использованием модуляции и компенсации приведена на рис. 6.39. Схема не требует особых пояснений [38].

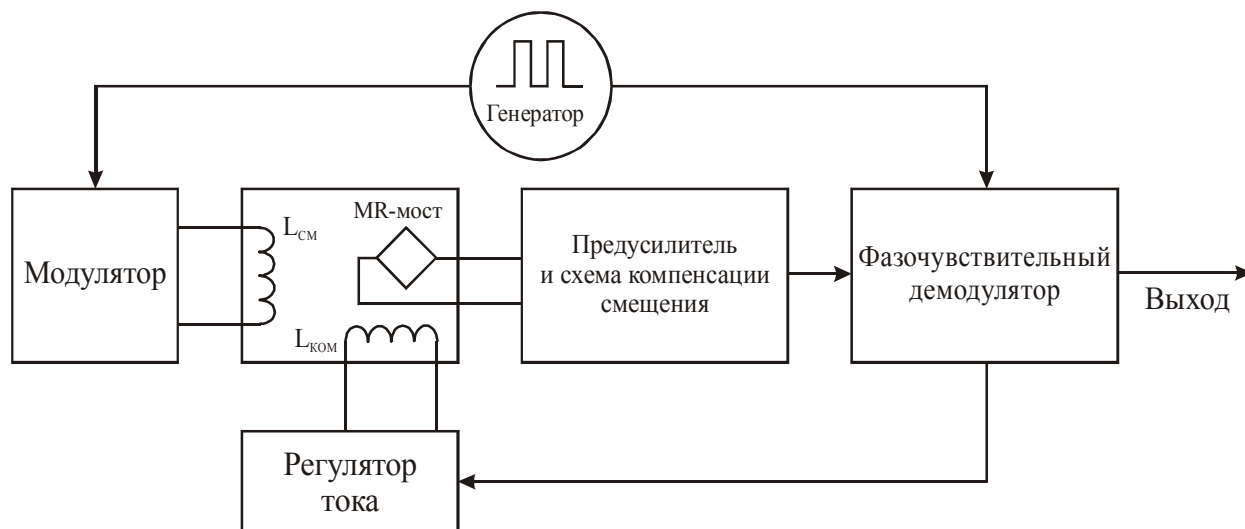


Рис. 6.39. Упрощенная функциональная схема входного устройства для определения направления на источник магнитного поля

Простое 2-координатное магнитоэлектронное устройство для определения вектора магнитного поля

Конструкция магнитоэлектронного устройства приведена на рис. 6.40. В данном МЭУ используется 2-координатный ориентационный магнитный датчик, который содержит два моста типа КМЗ10. Мосты располагаются перпендикулярно друг другу и закрепляются внутри одной катушки смещения.

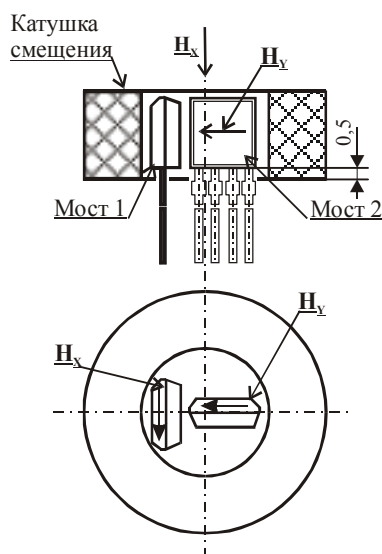


Рис. 6.40. Конструкция магнитного датчика с использованием двух мостов КМЗ10 и катушки смещения

Катушка смещения содержит 100 витков медного провода диаметром 0,35 мм. Сопротивление катушки постоянному току – 0,6 Ом, индуктивность – 87 мкГн, напряженность осевого магнитного поля – 8,3 (кА/м)/ А.

Принципиальная электрическая схема устройства приведена на рис. 6.41.

Принцип действия магнитоэлектронного устройства достаточно прост. Генератор прямоугольных импульсов выполнен на микросхемах DD4.1, DD4.2, DD3, DD4.3, DD4.4, DD4.5, DD4.6 и транзисторах VT1, VT2. Напряжение с выхода генератора через разделительный конденсатор С7 и резистор R15 подается на катушку смещения L1 (рис. 6.41). Частота следования импульсов составляет ~70 Гц.

Переменные напряжения U_x и U_y с магниторезисторных мостов R1 и R2 через дифференцирующие цепи C1, R3 и C2, R9 поступают на операционные усилители DA1.1 и DA1.2, а после усиления – на два синхронных демодулятора DD1, DD2, которые генерируют выходные сигналы $U_{\text{вых}X}$ и $U_{\text{вых}Y}$, пропорциональные компонентам X и Y магнитного поля [13].

Магнитоэлектронное устройство может быть использовано для построения электронного компаса. Приведенная электронная схема не нуждается в специальной температурной коррекции, поскольку определение вектора направления поля связано с отношением двух сигналов, а не с их абсолютными величинами.

МЭУ повышенной точности для определения вектора магнитного поля

Фирмой Valvo (отделением электроники фирмы Siemens) предложен еще один вариант магнитоэлектронного устройства повышенной точности [75]. Датчик магнитного поля этого устройства содержит три моста КМЗ10. Каждый из мостов размещен в своей катушке смещения, подобно варианту, приведенному на рис. 6.34.

Вариант конструкции сенсорной головки приведен на рис. 6.42. Для создания головки предложена трехфазная система, состоящая из трех датчиков, расположенных под углом 120° друг к другу (рис. 6.42.а).

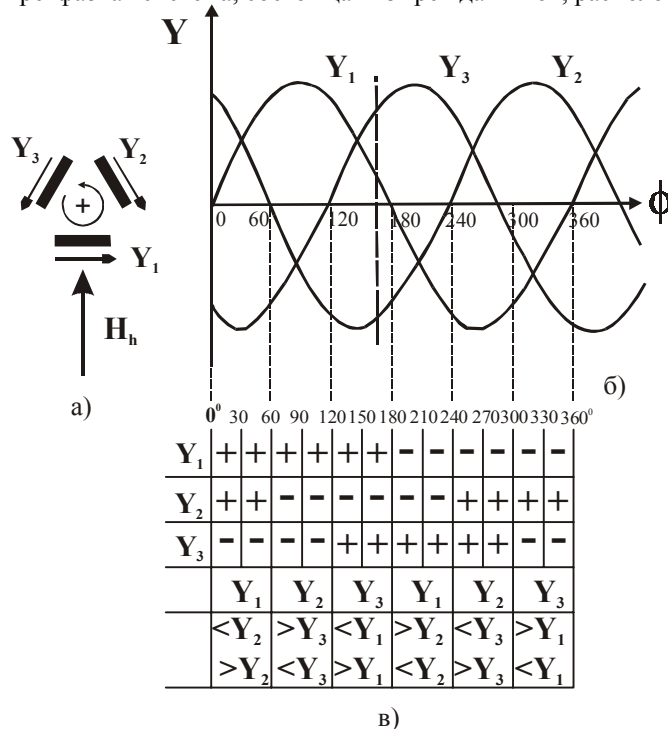


Рис. 6.42. Вариант конструкции сенсорной головки: а – схема размещения датчиков; б – эюры выходных сигналов трех сенсоров, смещенных на 120° при вращении в магнитном поле; в – таблица полярностей сигнала в пределах 30°

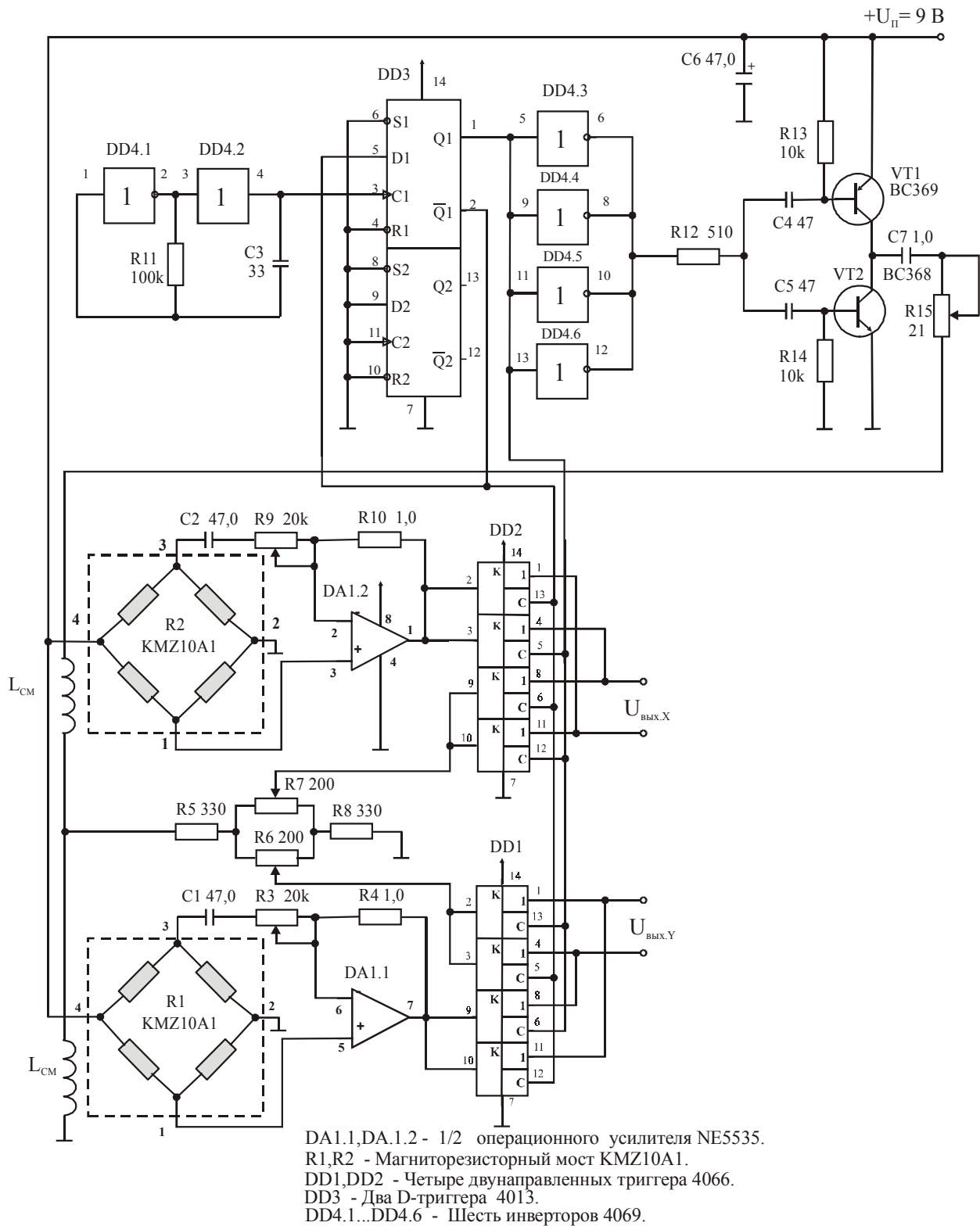
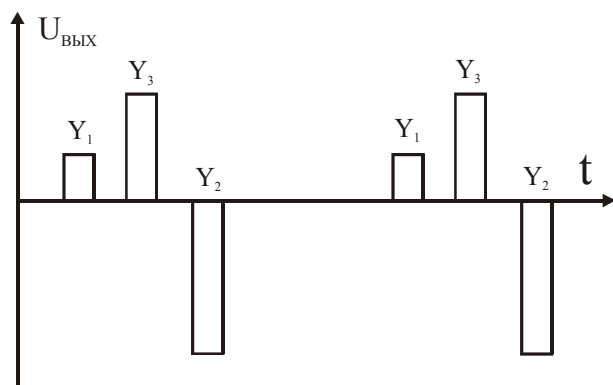


Рис. 6.41. Принципиальная электрическая схема сравнительно простого магнитоэлектронного устройства для определения направления МПЗ

В этом случае каждый вектор (см. рис. 6.42.б,в) можно спроектировать на каждую из трех осей. При этом сумма величин новых векторов, идущих в этом направлении, однозначно равна нулю (рис. 6.42б). Это значит, что при измерении $U_{\text{вых}}$ исчезает постоянное напряжение. Выходной сигнал такой системы имеет вид, показанный на рис. 6.43. Схема входного каскада всего устройства приведена на рис. 6.44.



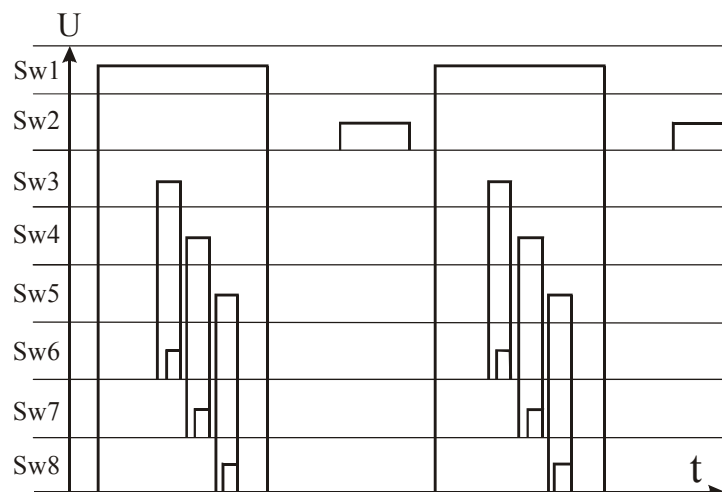


Рис. 6.45. Временная схема командного сигнала

Схемы входных устройств электронных компасов с использованием магнито-резисторных ИС серии НМС

На рис. 6.46 приведена принципиальная схема входного устройства электронного компаса с использованием гибридных магниторезисторных микросхем типа НМС 1001 [49]. Схема не требует особых пояснений. Катушка смещения датчика L_{CM} питается от генератора импульсов, выполненного на тиристоре VD1. Напряжение на компенсационную катушку смещения L_{KOM} поступает по отдельной цепи и на схеме (рис. 6.46) не показано.

Сигнал с датчика НМС 1001 усиливается инструментальным усилителем DA1 и поступает на 16-битовый аналого-цифровой преобразователь DD1, а с его выхода – на процессор, где обрабатывается по специальному алгоритму и выводится на регистрирующее устройство (обычно ЖКИ).

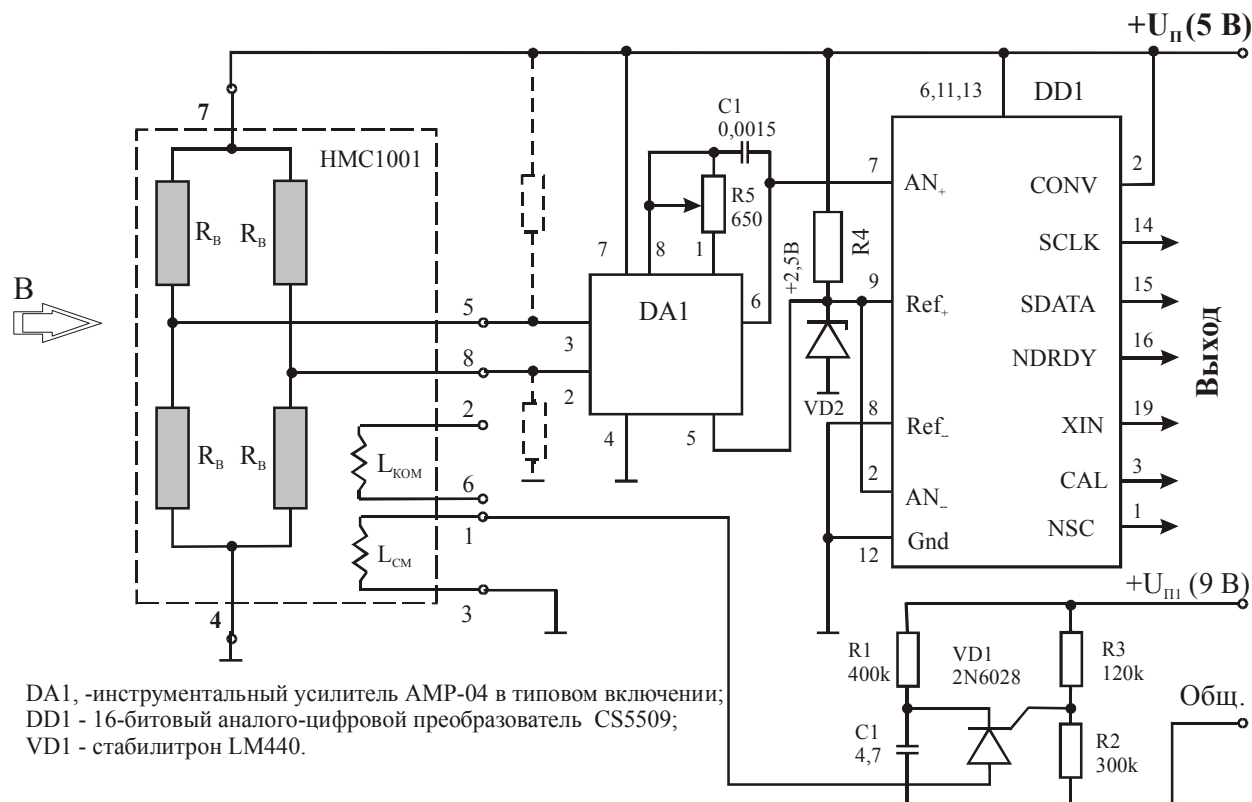


Рис. 6.46. Принципиальная схема входного каскада электронного компаса с цифровым интерфейсом

На рис. 6.47 приведена доработанная принципиальная схема входного устройства электронного компаса с использованием датчика HMC 1001. В эту схему введен стабилизатор тока питания датчика, выполненный на операционном усилителе DA2 и полевом транзисторе VT1.

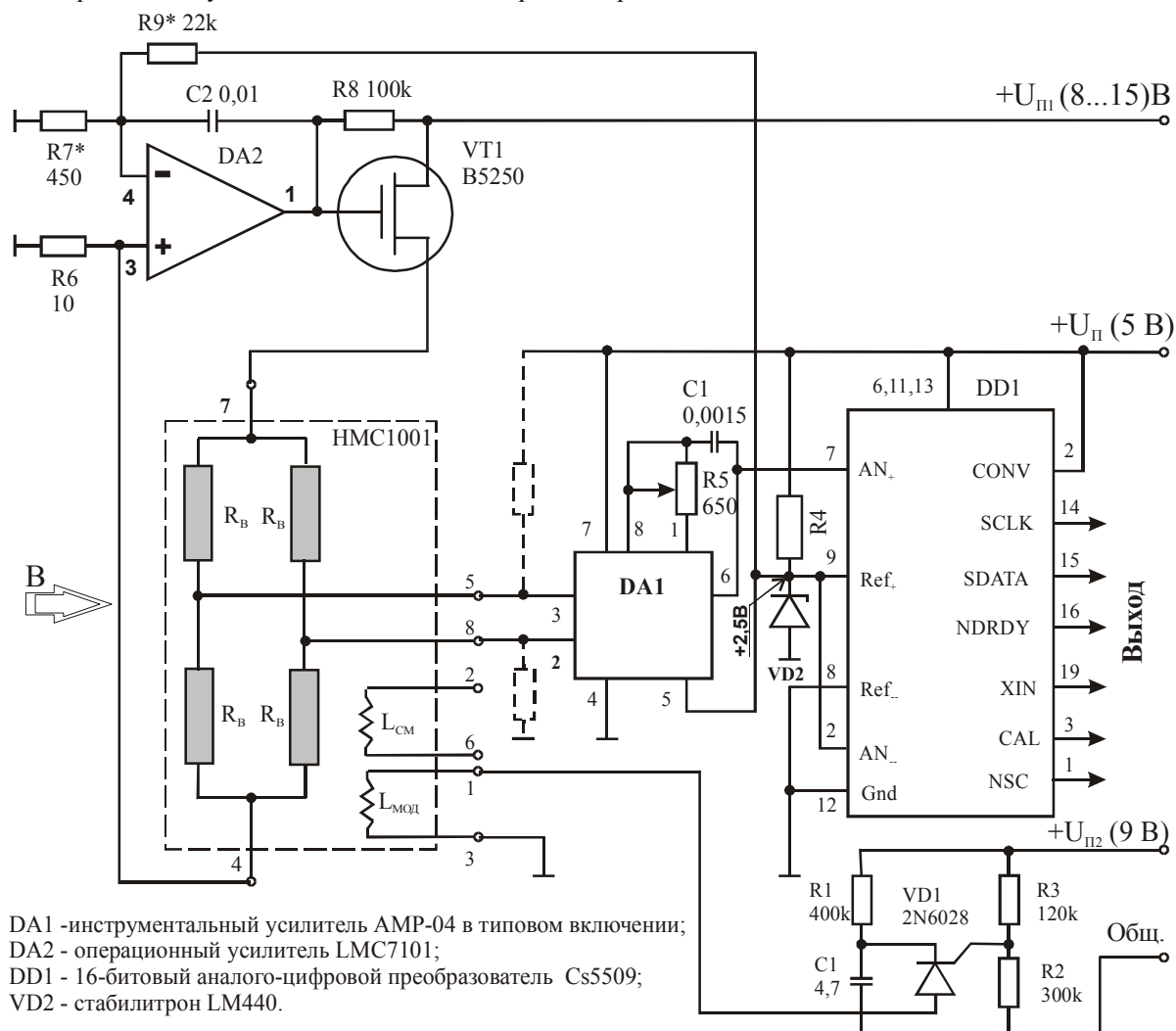


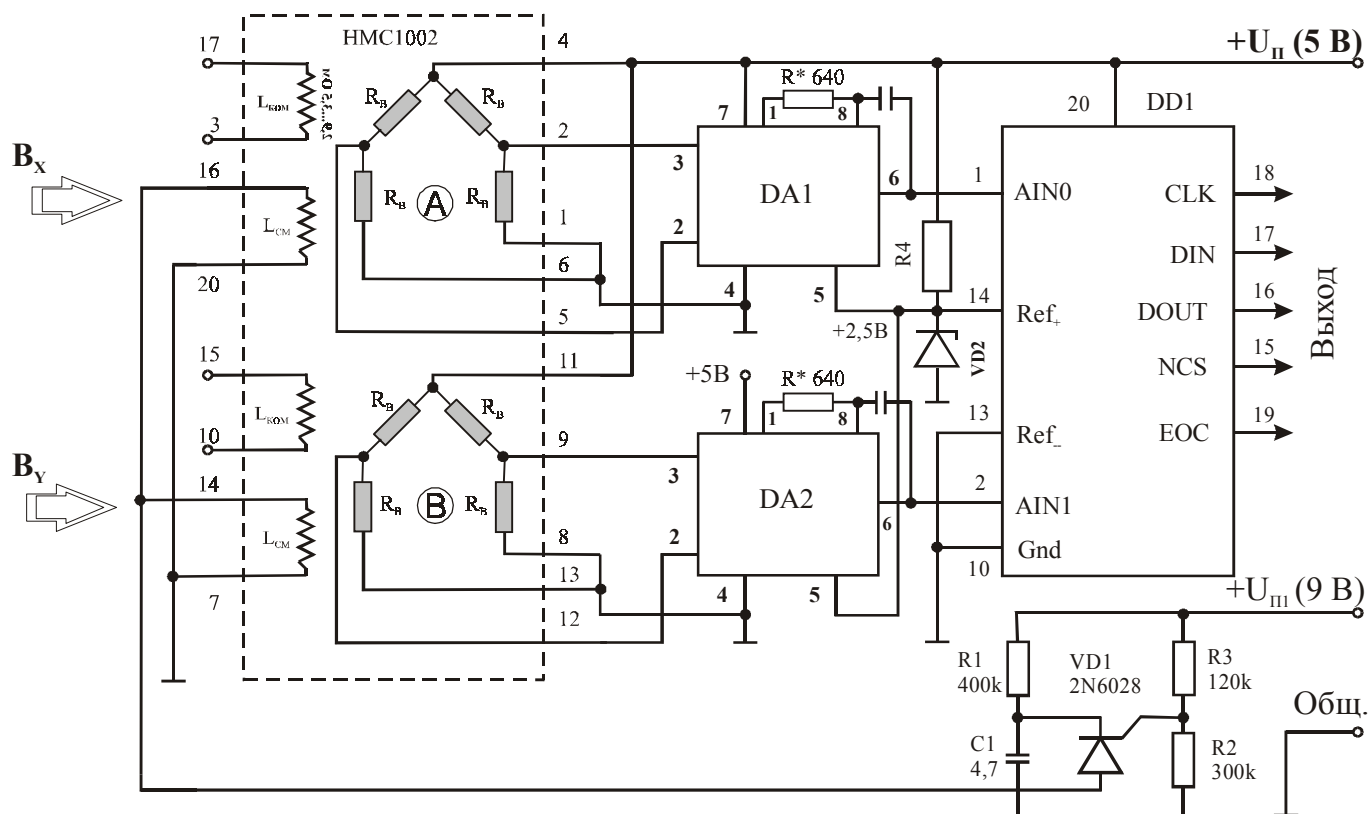
Рис. 6.47. Принципиальная схема входного каскада электронного компаса с цифровым интерфейсом и источником тока [50]

Для обеспечения приемлемой точности определения азимута магнитные датчики (рис. 6.46–6.47) должны устанавливаться в горизонтальном положении относительно поверхности Земли.

На рис. 6.48 приведена принципиальная схема входного устройства электронного компаса с использованием двухканальной магниторезисторной схемы типа HMC 1002 [49].

Особенностью данного варианта схемы прибора (рис. 6.48) является возможность регистрации векторов магнитного поля, воздействующих в двух взаимно перпендикулярных направлениях X и Y. Эта схема позволяет учитывать угол наклона датчика относительно плоскости горизонта, что значительно повышает точность определения азимута. Схема не требует особых пояснений.

Основные параметры и характеристики магниторезисторных ИС серии HMC приводятся в главе 24 т. 2.



DA1, DA2 - инструментальные усилители AMP-04 в типовом включении;
 DD1 - 12-битовый аналого-цифровой преобразователь TLC2543;
 VD2 - стабилитрон LM440.

Рис. 6.48. Принципиальная схема входного устройства электронного компаса с использованием магниторезисторной схемы типа HMC1002

6.4.6. Промышленные образцы ориентационных МД, реализованных с использованием ИС серии HMC

Фирма Honeywell на основе магнитных датчиков серии HMC выпускает ряд специализированных магнитоэлектронных устройств, предназначенных для применения в навигационной аппаратуре и приборах различного назначения.

Среди них можно отметить HMR2300, HMR2300г и HMR3000.

Интеллектуальный цифровой магнитометр HMR2300

Выполнен в виде отдельного магнитоэлектронного модуля. Представляет собой универсальный цифровой 3-координатный магнитометр. Прибор регистрирует магнитное поле, направленное по любой из трех осей (X, Y, Z). В состав магнитометра входят гибридный магнитный датчик типа HMC2003, три 16-разрядных АЦП, микропроцессор и СПЗУ.

Результаты измерений последовательно выводятся через стандартный 9-штырьковый разъем в двоично-десятичном (или двоичном) коде на скорости от 10 до 154 Гц. Для вывода информации используются стандартные интерфейсы RS-232 или RS-485.

Магнитометр смонтирован на одной печатной плате прямоугольной формы, размещенной в алюминиевом корпусе. Максимальные габариты – 102×38,1×28,7 мм, масса – 100 г.

Магнитометр HMR2300 используется в навигационной аппаратуре различных транспортных средств, в автоматизированном оборудовании для управления технологическими процессами в металлургии, в оснащении специализированных лабораторий, в аппаратуре для обнаружения магнитных аномалий, изделий и объектов из ферромагнитных материалов.

Интеллектуальный цифровой магнитометр HMR2300г

Выполнен в виде отдельного магнитоэлектронного модуля. Представляет собой специализированный цифровой 3-координатный магнитометр, разработанный для применения в авиационной и космической навигационной аппаратуре. Прибор регистрирует магнитное поле, направленное по любой из трех осей (X, Y, Z).

В состав магнитометра входят гибридный магнитный датчик типа НМС 2003, три 16-разрядных АЦП, микропроцессор и СПЗУ. Результаты измерений последовательно выводятся через стандартный 9-штырьковый разъем в двоично-десятичном или двоичном коде на скорости от 10 до 154 Гц. Для вывода информации используются стандартные интерфейсы RS-232 или RS-485.

Магнитометр смонтирован на одной круглой печатной плате. Максимальные габариты – $\varnothing 72 \times 15,3$ мм, масса – 40 г. Прибор соответствует требованиям стандарта MIL-STD-810E для военных и космических применений.

Цифровой модуль компаса HMR3000

Представляет собой цифровой 3-координатный магнитометр с 2-координатным датчиком наклона. Прибор регистрирует магнитное поле, направленное по любой из трех осей (X, Y, Z) и обеспечивает определение азимута при его наклоне до $\pm 45^\circ$.

В модуле используется гибридный магнитный датчик типа НМС 2003. Кроме того, в состав модуля входят 16-разрядные АЦП, микропроцессор и СПЗУ. Результаты измерений последовательно выводятся через стандартный 9-штырьковый разъем в двоично-десятичном или двоичном коде на скорости 20 Гц. Для вывода информации используются стандартные интерфейсы RS-232 или RS-485.

Выпускаются несколько вариантов прибора: в виде отдельной печатной платы или в алюминиевом корпусе. Максимальные габариты – $82,6 \times 25,4 \times 22,3$ мм, масса – 60 г.

Цифровой модуль HMR3000 предназначен для применения в океанографии, навигационных приборах водного транспорта и подводных лодок, бакенов, бурового и шахтного оборудования, наземных транспортных средств, авиационной и космической техники. Может работать совместно с GPS системами.

Основные параметры и внешний вид приборов типа HMR2300, HMR2300г и HMR3000 приводятся в главе 24 тома 2.

6.4.7. Устройство для определения вектора МП с применением ЭХ

Из рассмотренных в главе 2 принципов и диаграмм направленности ПМП видно, что для измерения направления В могут быть использованы элементы Холла, у которых диаграмма направленности близка к идеальной в слабых магнитных полях. При этом принципиально возможны два способа определения направления вектора В: по максимуму или по минимуму выходной величины.

Известно, что чувствительность к углу поворота S_α элемента Холла является функцией угла α между направлениями В магнитной оси элемента i_m^0 :

$$S_\alpha = S_B \times B \times \sin \alpha$$

Следовательно, если определение направления В производится по максимуму выходной величины ($\alpha \Rightarrow 0$), то чувствительность S_α оказывается стремящейся к нулю. С учетом этого в подавляющем большинстве случаев направление вектора В определяется по минимуму выходной величины элемента Холла. Тогда S_α достигает своего максимального значения $S_{\alpha, \max} = S_B \times B$.

В настоящее время наибольшее значение магнитной чувствительности S_B (примерно 5 В/Тл) получено у пленочных элементов Холла, изготовленных из антимонида индия [7, 20].

Таким образом, наибольшее достижимое значение $S_{\alpha, \max}$, скажем, при измерении направления горизонтальной составляющей магнитной индукции поля Земли $B_{xy} = 0,15 \times 10^{-4}$ Тл в районе г. С. Петербурга равно 75×10^{-6} В/рад = 1,3 В/градус.

Порог чувствительности элемента Холла по углу поворота, как и в любом другом случае, определяется соотношением между S_α и нестабильностью (дрейфом) его нулевого сигнала U_0 .

Если элемент Холла питать от источника переменного тока, позволяющего исключить взаимное влияние на нулевой сигнал элемента термо-ЭДС и термомагнитных явлений, то значение ΔU_0 будет определяться главным образом дрейфом напряжения неэквипотенциальности $U_{\text{ост}}$. У лучших экземпляров пленочных ЭХ из антимонида индия эта величина даже при практически неизменной температуре окружающей среды за время измерения лежит в пределах $(1-2) \times 10^{-7}$ В. Исходя из этого, наименьший порог чувствительности элемента Холла по углу поворота при измерении той же горизонтальной составляющей B_{xy} может быть равен $5-10^{-4}$ [7, 20].

Чувствительность измерительного устройства, в котором используется элемент Холла, может быть резко увеличена путем применения концентраторов магнитного потока, выполняемых в виде стержней из материала с высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой.

Так, например, применение концентратора из пермаллоя или феррита длиной 500 мм и сечением 50 мм² дает увеличение чувствительности примерно в 10^3 . Однако снижения порога чувствительности при этом не происходит. Более того, он достигает $0,5^\circ$ в поле Земли, что объясняется нестабильностью нулевого сигнала измерительного устройства в результате гистерезисных явлений в концентраторе. Подробнее см. [7].

Определение направления вектора магнитной индукции, как правило, имеет смысл только в том случае, если оно производится относительно вполне определенной системы координат. В качестве такой системы можно использовать систему, образованную направлениями осей каких-либо объектов или систему физических векторов, расположение которых заранее известно.

Например, при измерении вектора магнитной индукции поля Земли B_T используют прямоугольную систему координат, образованную двумя векторами, совпадающими по направлению с географическим меридианом и местной вертикалью, и третьим вектором, перпендикулярным к ним.

В этом случае направление B_T задается двумя углами: углом между проекцией B_T на горизонтальную ось и магнитным меридианом (склонение) и углом между B_T и местной вертикалью (наклонение).

Весьма часто возникает и другая задача, когда относительно известного направления B требуется определить направление оси объекта. При этом в навигации и некоторых других областях практической деятельности для определения направления оси обычно пользуются азимутом (углом между осью объекта и местной вертикалью).

Оригинальное устройство, позволяющее решить эту задачу, описано в работе [7], а конструкция устройства приведена на рис. 6.49.

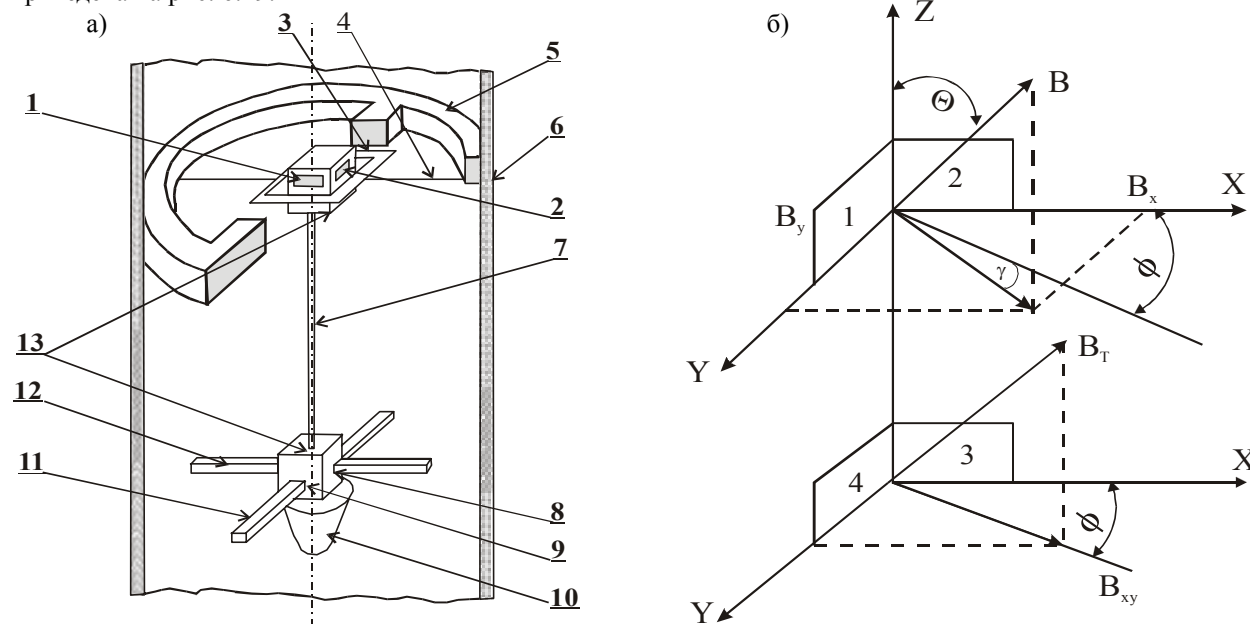


Рис. 6.49. Устройство для определения направления оси объекта контроля: а – конструкция; б – расположение осей

Устройство (рис. 6.49) включает в себя четыре дискретных элемента Холла 1–4. Два из них (1, 2) закреплены на карданном подвесе 3 (4 – оси карданного подвеса) и находятся внутри воздушного зазора магнитной системы 5, жестко связанной с объектом 6, так что направление B перпендикулярно оси объекта. Два других элемента Холла (8, 9) жестко скреплены с концентраторами, перпендикулярными их плоскости.

Из рис. 6.49, видно, что концентратор 12 перпендикулярен плоскости элемента Холла 8, а концентратор 11 – плоскости элемента 9. Элементы Холла 1 и 2 жестко связаны немагнитным стержнем 7 с элементами 8 и 9.

Плоскости элементов Холла 1 и 2 и, соответственно, 8 и 9 взаимно перпендикулярны, что достигается путем наклеивания их на смежные грани кубиков 13. Благодаря грузу 10 стержень и, следовательно, плоскости элементов Холла всегда занимают вертикальное положение.

Токовые цепи элементов Холла 1, 8 и 2 включены попарно последовательно и питаются токами I_1 и I_2 , сдвинутыми относительно друг друга на угол $\pi/2$, то есть если

$$I_1 = I_m \times \sin \omega t, \text{ то } I_2 = I_m \times \cos \omega t \quad (6.5)$$

Холловские электроды элементов 1, 2 и 8, 9 тоже соединены последовательно и согласованно, так что, как показано в работе [7], на выходе элементов Холла 1 и 2 имеется суммарная ЭДС, равная

$$e_I = e_1 + e_2 = k \times I_m \times B \times \sin \Theta \times \sin(\omega t + \varphi + \gamma) \quad (6.6)$$

где φ – угол между B_x и проекцией магнитной индукции поля Земли B_T на горизонтальную плоскость;

γ – угол азимута;

k – постоянный коэффициент.

Поскольку элементы Холла 8 и 9 реагируют на составляющую магнитной индукции, параллельную осям соответствующих концентраторов, то их суммарная ЭДС равна:

$$e_{II} = k \times I_m \times B_T \times \sin(\omega t + \gamma) \quad (6.7)$$

Таким образом, измерив фазометром разность фаз между e_I и e_{II} , можно определить угол γ .

Модуль e_I , измеряемый милливольтметром, пропорционален синусу зенитного угла Θ . Подробнее см. [7].

Элементы Холла находят широкое применение в различных системах ориентации. Для этого специально разработаны ЭХ, регистрирующие магнитное поле в двух или в трех взаимно перпендикулярных осях. При этом первые условно можно называть 2-координатными, а вторые – 3-координатными приборами.

Зарубежными фирмами выпускается широкая номенклатура таких приборов.

В качестве примеров можно назвать 2-координатные ЭХ типа ВН-706 (фирма F. W. Bell) или 3-координатные ЭХ типа ВН-703 (фирма F. W. Bell) и 3D-H-10 (фирма Sentron AG).

Внешний вид и основные параметры указанных датчиков приведены в главе 24.

Более совершенными приборами являются интегральные датчики, реализованные на основе ЭХ. Конструкция таких датчиков, кроме интегрального элемента Холла, содержит схемы предварительного усиления и обработки сигнала.

Примерами интегрального ориентационного датчика могут служить магнитные датчики типа 1490, 1525 и 1625, выпускаемые фирмой Dinsmore Instrument Co. Датчики данной серии размещаются в миниатюрном корпусе и содержат все необходимые элементы. Сигнал на выходе датчика может выдаваться в аналоговой форме (1525 и 1625) и в цифровой форме (1490).

Напряжение питания датчиков составляет 5В для типа 1525 и 1625 и 5–18 В – для типа 1490 при потребляемом токе до 30 мА. Датчики могут работать при наклоне до 12° относительно поверхности Земли.

Внешний вид и выходная характеристика датчиков типа 1525 приведена на рис. 6.50. Остальные параметры рассмотрены в главе 24 тома 2.

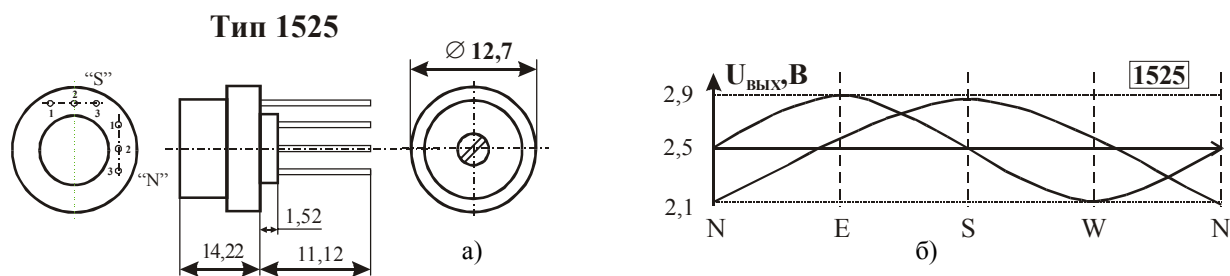


Рис. 6.50. Датчик типа 1525: а – внешний вид; б – выходная характеристика

Более совершенным вариантом является интеллектуальный датчик магнитного поля Земли типа EMF-01, выпускаемый нидерландской фирмой Xensor Integration bv [36]. Датчик размещается в пластмассовом корпусе, выполненном в виде куба. Внешний вид датчика приведен на рис. 6.51.

В корпусе датчика размещаются два кремниевых кристалла размером 4х4 мм, каждый из которых расположен на отдельной гибкой подложке. В кристалле сформированы интегральный элемент Холла и схема усиления и обработки сигнала. Кристаллы размещаются в корпусе датчика под углом 90° друг к другу. В том же корпусе находится и микропроцессор. Напряжение питания датчика – 5 В, ток потребления – не более 3 мА. Датчик может работать при наклоне до 45° относительно поверхности Земли.

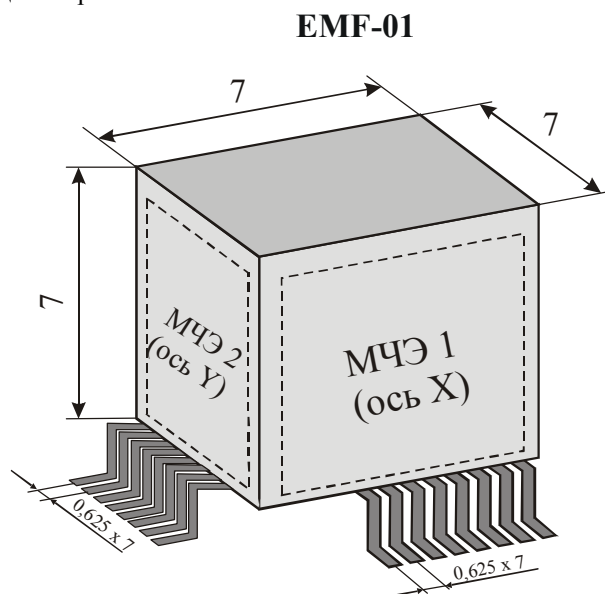
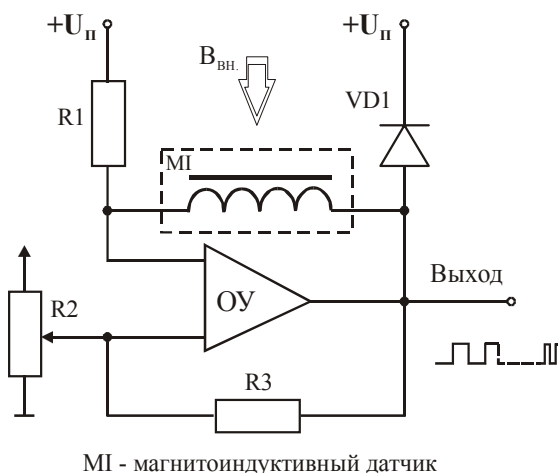


Рис. 6.51. Внешний вид датчика магнитного поля Земли типа EMF-01

6.4.8. Устройства для определения вектора МП с использованием магнитоиндуктивных датчиков

В последнее время все более широкое распространение получают магнитоэлектронные устройства с магнитоиндуктивными датчиками (см. главу 2). Эти устройства обладают высокими магнитоэлектрическими параметрами и эксплуатационными характеристиками, они компактны и дешевы.



На рис. 6.52 приведена упрощенная схема включения магнитоиндуктивного датчика в электронную схему магнитоуправляемого генератора импульсов. Эта схема не требует особых пояснений. Частота импульсов на выходе генератора зависит от напряженности управляющего магнитного поля. По существу на выходе такой схемы возникает сигнал, пригодный для цифровой обработки.

Рис. 6.52. Упрощенная схема включения магнитоиндуктивного датчика в электронную схему магнитоуправляемого генератора импульсов

Ведущим производителем ориентационных магнитоэлектронных устройств на основе магнитоиндуктивных датчиков является фирма Precision Navigation Inc. Она выпускает целый ряд специализированных магнитоэлектронных устройств, предназначенных для использования в 2- и 3-координатных магнитометрах. Среди таких приборов можно отметить Vector-2X, Vector-2GX, TCM-2, Wayfinder-VR и др. Внешний вид двух таких устройств приведен на рис. 6.53.

Далее приводим краткие характеристики приборов типа TCM-2, Vector-2X, Vector-2GX и Wayfinder-VR.

Электронный модуль компаса TCM-2

Представляет собой сочетание 3-координатного магнитометра с 2-координатным датчиком наклона. Прибор регистрирует магнитное поле, направленное по любой из трех осей (X, Y, Z) и обеспечивает определение азимута при его наклоне до $\pm 40^\circ$. В модуле используются магнитоиндуктивные датчики, 16-разрядные АЦП, микропроцессор и СПЗУ.

Результаты измерений выводятся через 10-штырьковый разъем в аналоговой или цифровой форме. В цифровой форме данные последовательно выводятся в двоично-десятичном или двоичном коде на скорости 16 и 30 Гц. Для вывода информации используется стандартный интерфейс RS-232. Прибор размещен на отдельной печатной плате. Максимальные габариты – 63,5×50,8×28 мм, масса – 50 г.

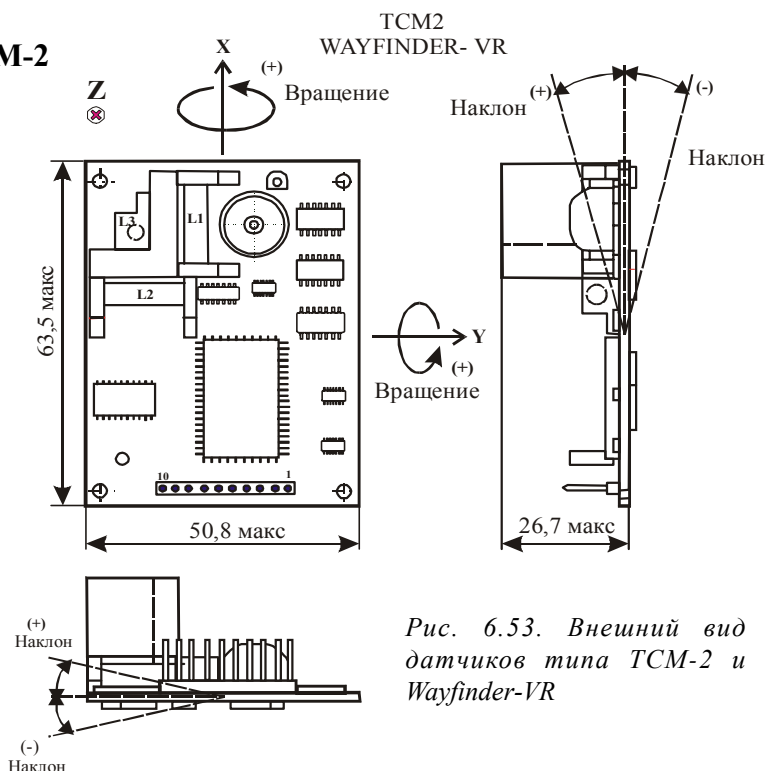


Рис. 6.53. Внешний вид датчиков типа TCM-2 и Wayfinder-VR

Модуль TCM-2 предназначен для применения в океанографии, в навигационных приборах водного транспорта и подводных лодок, бакенов, бурового и шахтного оборудования, наземных транспортных средств, авиационной и космической техники, робототехники, аппаратуре для подводного ориентирования и аппаратуре слежения за миграцией животных. Может работать совместно с GPS системами.

Магнитометры Vector-2X и Vector-2GX

Выполнен в виде отдельного магнитоэлектронного модуля. Представляет собой универсальный цифровой 2-координатный магнитометр, построенный с использованием двух магнитоиндуктивных датчиков. Прибор регистрирует магнитное поле, направленное по любой из двух осей (X, Y).

Результаты измерений последовательно выводятся по трехпроводной линии в двоично-десятичном или двоичном коде на скорости от 10 Гц. Выпускается в двух модификациях: Vector-2VX и Vector-2GX.

Модуль *Vector-2VX* смонтирован на одной печатной плате прямоугольной формы. Максимальные габариты – 38,1×36,3×9,9 мм, масса – 13 г.

Модуль *Vector-2GX* смонтирован на двух параллельно закрепленных печатных платах прямоугольной формы. Модуль снабжен двумя миниатюрными механическими карданными подвесами, на которых устанавливаются магнитоиндуктивные датчики, что обеспечивает нормальную работу прибора при значительных углах наклона. Максимальные габариты модуля Vector-2GX – 33×38,1×15,8 мм, масса – 30 г.

Магнитометры Vector-2X и Vector-2GX предназначены для применения в навигационной аппаратуре различных транспортных средств, в сейсмической аппаратуре, в аппаратуре для обнаружения изделий и объектов из ферромагнитных материалов и для совместной работы с GPS системами.

Магнитный датчик Wayfinder-VR

Выполнен в виде отдельного магнитоэлектронного модуля. Представляет собой цифровой 3-координатный магнитометр, сопряженный с 2-координатным датчиком наклона. Прибор регистрирует магнитное поле, направленное по любой из трех осей (X, Y, Z) и обеспечивает определение азимута при его наклоне до $\pm 50^\circ$. В модуле используются магнитоиндуктивные датчики, АЦП, микропроцессор и СПЗУ.

Результаты измерений последовательно выводятся через 10-штырьковый разъем в двоично-десятичном или двоичном коде на скорости 5–40 Гц. Для вывода информации используется стандартный интерфейс RS-232C.

Модуль *Wayfinder-VR* смонтирован на одной печатной плате прямоугольной формы. Максимальные габариты – 63,5×50,8×28 мм, масса – 50 г.

Магнитный датчик Wayfinder-VR предназначен для применения в навигационной аппаратуре различных транспортных средств и для совместной работы с GPS системами.

Основные параметры и внешний вид приборов типа TCM-2, Vector-2X, Vector-2GX и Wayfinder-VR приводятся в главе 24 тома 2.

Устройства для определения вектора магнитного поля с применением феррозондов

Принципы работы устройств, использующих феррозондовые преобразователи магнитного поля, рассмотрены во многих изданиях технической литературы. А потому в качестве примера приводим очень краткие описания принципов работы нескольких устройств таких устройств.

Конструкция простейшего *феррозондового датчика направления*, используемого в автомобильном навигаторе, приведена на рис. 6.54 [23].

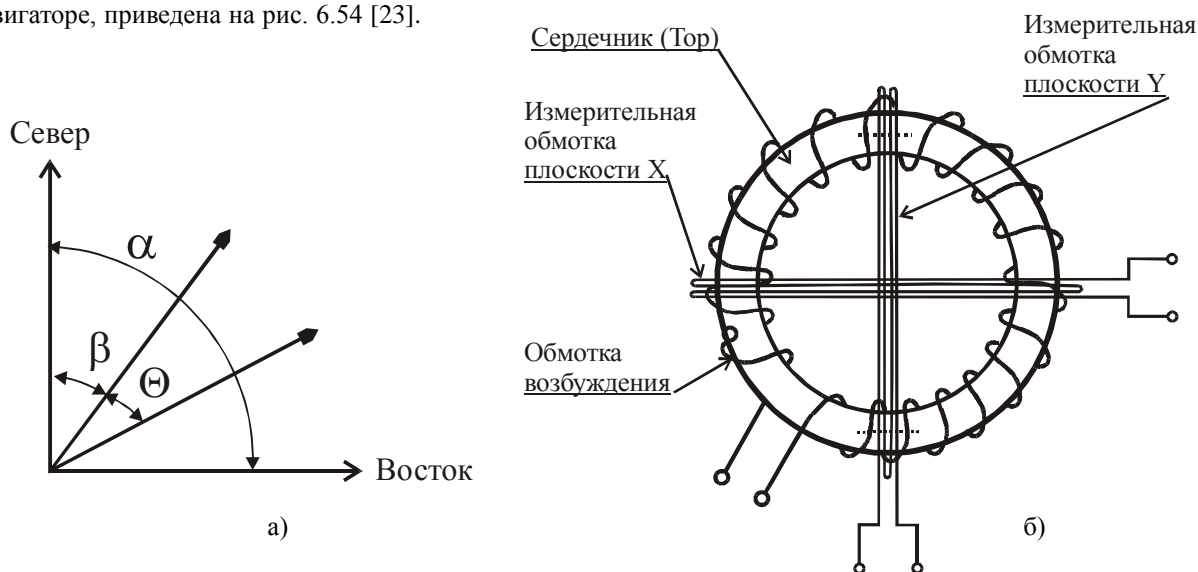


Рис. 6.54. Датчик МПЗ автомобильного навигатора: а - способ вычисления азимута пункта назначения; (б) – устройство датчика: α – курс движения автомобиля относительно севера; β – курс на пункт назначения относительно севера; γ – относительный азимут (азимут пункта назначения)

Датчик навигатора (рис. 6.54.б) представляет собой кольцо из материала с высокой магнитной проницаемостью, на которое намотаны обмотка возбуждения и перпендикулярно друг другу две измерительные обмотки.

Принцип действия датчика заключается в следующем. Если на обмотку возбуждения подать переменное напряжение, то магнитный поток в сердечнике будет изменяться и за счет возникновения электромагнитной индукции на выходе измерительных обмоток появится «наведенное» напряжение. При отсутствии внешнего магнитного поля напряжение на измерительных обмотках будет отсутствовать, поскольку изменение магнитного потока в этом случае вызывает, как показано на рис. 6.55.б, появление в точках S_1 и S_2 сердечника напряжений противоположной полярности, которые компенсируют друг друга.

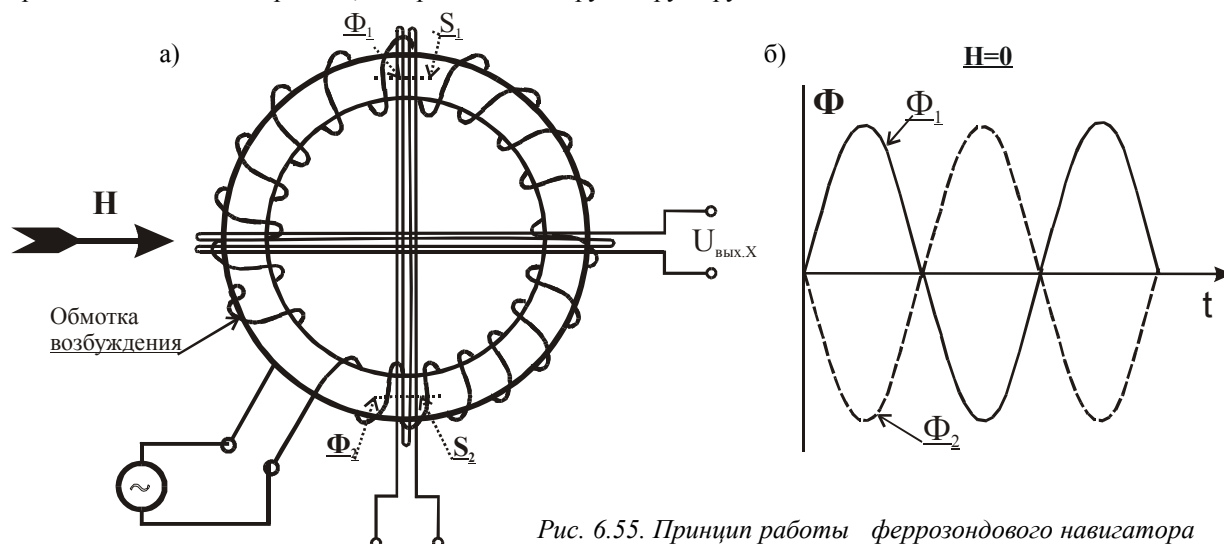


Рис. 6.55. Принцип работы феррозондового навигатора

Если перпендикулярно измерительной обмотке X воздействует магнитное поле с напряженностью H , то оно складывается с магнитным полем возбуждения и изменения магнитного потока становятся асимметричными (см. рис. 6.56.а и 6.56.б). В результате этого появляется выходное напряжение, пропорциональное производной разности магнитных потоков.

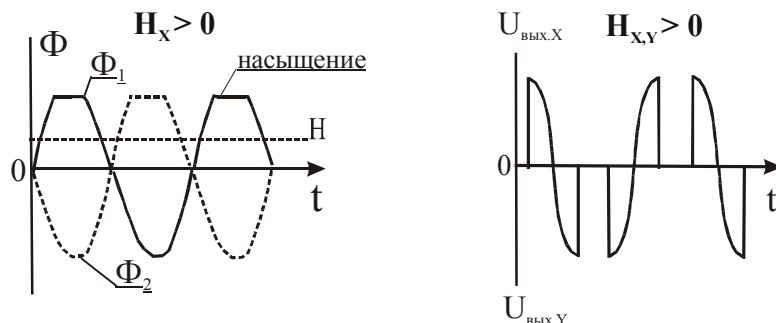


Рис. 6.56. Эпюры выходного напряжения феррозондового датчика: а – при $H_x > 0$; б – при $H_{x,y} > 0$

Если внешнее магнитное поле H прикладывается под углом Θ , то на измерительных обмотках X и Y появляются напряжения, равные соответственно:

$$U_{\text{вых.X}} = k \times H \times \cos \Theta \quad (6.8)$$

$$U_{\text{вых.Y}} = k \times H \times \sin \Theta \quad (6.9)$$

Следовательно, угол Θ можно определить по следующей формуле и установить курс перемещения объекта (рис. 6.54.а):

$$\Theta = \arctg \frac{U_{\text{вых.X}}}{U_{\text{вых.Y}}} \quad (6.10)$$

где k – коэффициент преобразования, определяемый конструкцией датчика;

$U_{\text{вых.X}}$ – напряжение на выходе измерительной обмотки X;

$U_{\text{вых.Y}}$ – напряжение на выходе измерительной обмотки Y.

Зарубежные фирмы выпускают широкую номенклатуру миниатюрных магнитных датчиков для определения вектора магнитного поля, использующих феррозонды.

На рис. 6.57 показан внешний вид и дана выходная характеристика датчика типа TMS-215, выпускаемого фирмой TDK. На рис. 6.58 приведена упрощенная функциональная схема датчика.

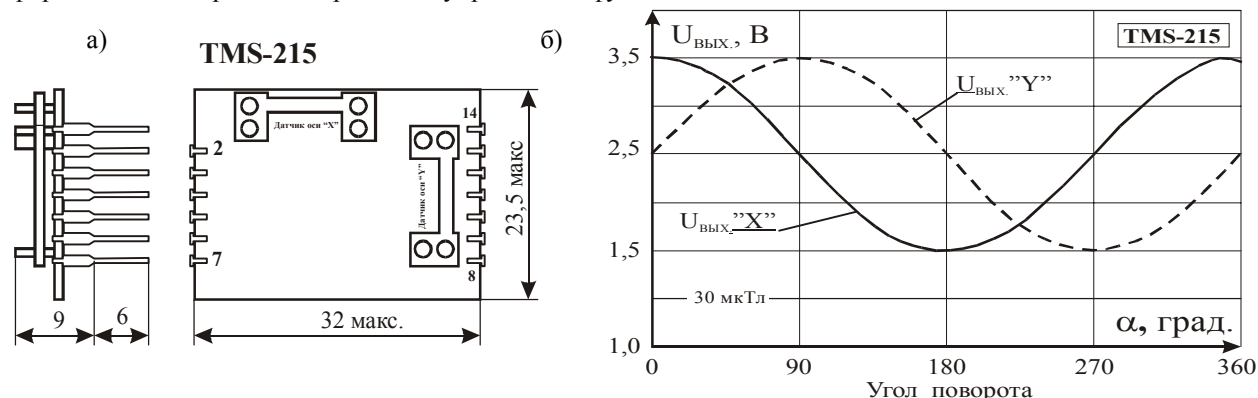


Рис. 6.57 Датчик типа TMS-215: а – внешний вид; б – выходная характеристика

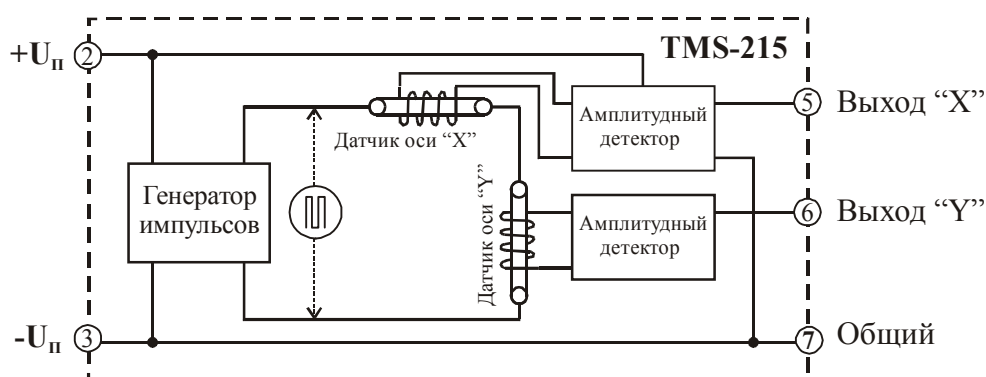


Рис. 6.58. Упрощенная функциональная схема датчика типа TMS-215

Ведущим производителем феррозондовых датчиков является фирма Applied Physics System, которая выпускает серию датчиков: APS544, APS520, APS520A, APS533, APS534, APS428C, APS450, APS460, APS470, HP3529 и др.

Далее приводится краткая характеристика датчика типа APS544.

Миниатюрный ориентационный датчик угла APS544

Представляет собой 3-координатный магнитометр, сопряженный с 3-координатным акселерометром. Прибор регистрирует магнитное поле, направленное по любой из трех осей (X, Y, Z).

Прибор выполнен в виде отдельного модуля. В модуле используется миниатюрный феррозондовый датчик, схема усиления и обработки сигнала. Результаты измерений выводятся по специальному кабелю в цифровой форме. Для вывода информации используется стандартный интерфейс RS-232.

Прибор размещен в пластмассовом корпусе прямоугольной формы. Максимальные габариты – 19,1×19,1×117 мм, масса – 50 г. Внешний вид этого датчика показан на рис. 6.59.

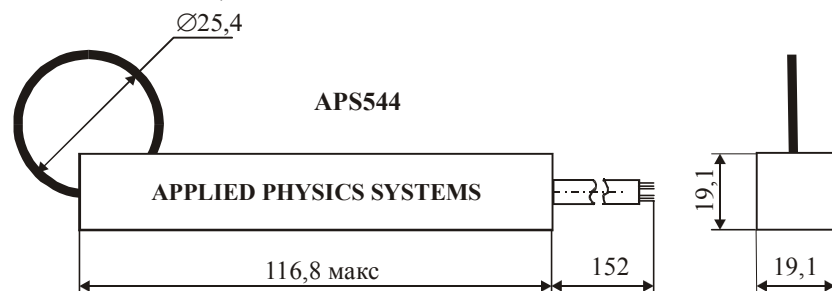


Рис. 6.59. Внешний вид ориентационного датчика типа APS544

Ориентационный датчик APS544 предназначен для применения в системах ориентации и навигации различного назначения (в том числе буровых установок и бакенов); для измерения параметров магнитных полей, для аппаратуры слежения за миграцией животных и т.п.

Основные параметры и внешний вид феррозондовых датчиков, предназначенных для определения вектора магнитного поля, приводятся в главе 24 тома 2.

Дополнительные сведения см. [33, 34, 36, 38, 39, 40, 44, 46, 47, 48, 50, 52, 53, 55, 60, 61, 65, 66, 69, 71, 72].

6.5. МЭУ в аппаратуре исследования и визуализации магнитного поля

При контроле сложных технических объектов приходится сталкиваться с нестационарными магнитными полями, поведение и рельеф которых во многом зависят от режимов работы объекта. Слежение за общим состоянием магнитных полей и их анализ позволяют с большой достоверностью судить о процессах, происходящих в контролируемом сложном объекте, и управлять этими процессами.

Задачи контроля нестационарных магнитных полей возникают при работе с различными производственными установками, при исследованиях свойств управляемых технологических процессов, в дефектоскопии ферромагнитных изделий с большой поверхностью и др. Электромагнитные процессы в электротехнике, процессы проката листовой стали в металлургии, производство стальных тросов, труб и постоянных магнитов – все это требует автоматического контроля магнитных полей для осуществления эффективного управления производством.

При контроле параметров неоднородного магнитного поля в основном решаются две задачи:

- определение составляющих градиента магнитной индукции в локальных точках контролируемого объекта;
- топографирование (или визуализация) всей поверхности объекта.

6.5.1. Измерение параметров неоднородного магнитного поля

При определении параметров неоднородного магнитного поля обычно производят измерение напряженности H или магнитной индукции B и их градиента ΔB_G или ΔH_G . Для таких измерений используется специальная аппаратура с применением различных преобразователей магнитного поля. Процесс измерений сводится к сканированию исследуемой поверхности с определением значений B и H в локальных точках данной поверхности. Основным параметром измерительной аппаратуры является разрешающая способность.

Разрешающая способность R_G характеризует способность аппаратуры измерять значения B или H в двух максимально близких друг к другу точках контролируемой поверхности. На рис. 6.60.а разрешающая способность определяется расстоянием между точками 1–2. Отрезок, обозначенный σ_G , определяет предел разрешения. В большинстве случаев разрешающая способность определяется параметрами используемых преобразователей магнитного поля.

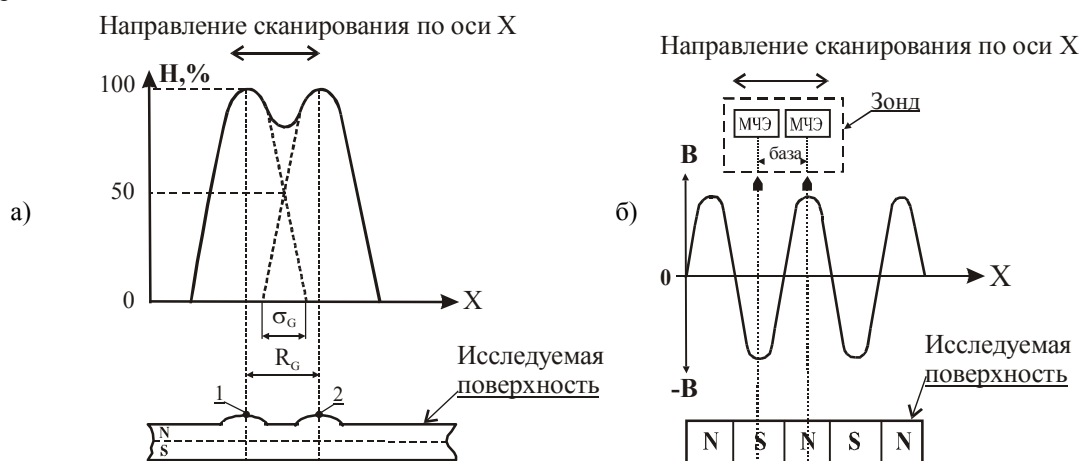


Рис. 6.60. Схемы определения: а – разрешающей способности; б – градиента магнитной индукции

Простейшее устройство для измерения составляющих градиента магнитной индукции состоит из двух преобразователей магнитного поля, размещенных на общем основании. Это устройство называется измерительным зондом. Зонд устанавливается на специальном приспособлении, позволяющем перемещать преобразователи на необходимое расстояние в заданном направлении, например, вдоль осей X или Y . В качестве ПМП обычно используются элементы Холла или магниторезисторы.

Процесс измерений составляющих градиента магнитной индукции сводится к сканированию исследуемой поверхности путем перемещения зонда по осям X и Y с регистрацией координат и величины индукции в каждой паре фиксируемых точек поверхности (рис. 6.60.б).

На рис. 6.61 приведена электрическая схема измерений градиента индукции магнитного поля при использовании в качестве ПМП элементов Холла.

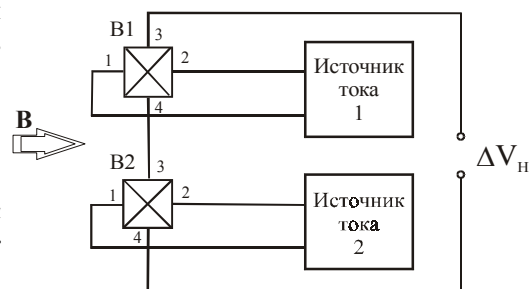


Рис. 6.61. Упрощенная принципиальная схема устройства для измерения градиента магнитной индукции, реализованного с применением элементов Холла

В данном случае измерительный зонд представляет собой немагнитное, теплопроводящее основание, которое помещается в металлический корпус из тонколистовой нержавеющей «немагнитной» стали. На основании, являющемся и плоскостью симметрии датчика, на определенном расстоянии друг от друга закрепляются два идентичных элемента Холла. В этом случае расстояние между центрами магниточувствительных элементов называется *базой*. Элементы корпуса и кристаллы ЭХ размещаются симметрично относительно общего основания. При этом токовые выводы обоих элементов, питающихся от отдельных источников тока, включаются встречно-последовательно (рис. 6.61).

Чтобы повысить точность измерения градиента магнитной индукции, оба элемента тщательной регулировкой токов управления приводят к одинаковой магнитной чувствительности и, при необходимости, используют специальные *схемы термостабилизации*.

Для измерения составляющих градиента магнитной индукции зонд перемещают параллельно исследуемой поверхности и фиксируют координаты зондовой головки и напряжение Холла V_H . При этом в каждом фиксированном положении зондовой головки индукция магнитного поля B может определяться напряжением Холла:

$$V_{H1} = \gamma_1 \times B \times I_{уп1} \text{ и } V_{H2} = \gamma_{21} \times B \times I_{уп2} \quad (6.11)$$

где γ_1, γ_2 – магнитная чувствительность элементов Холла;

$I_{уп}$ – ток управления каждого элемента.

При наличии неоднородности магнитного поля в направлении, перпендикулярном плоскости МЧЭ, разность холловских напряжений двух ЭХ будет пропорциональна градиенту магнитной индукции, которая при известной базе составляет:

$$\Delta V_H = k \times I_{уп} \times \Delta B \quad (6.12)$$

где k – коэффициент, определяемый конструкцией датчика.

Благодаря полной симметричности конструкции датчика обеспечиваются строго одинаковые условия теплоотвода от каждого кристалла. Для данных целей элементы Холла изготавливаются по групповой технологии из одной полупроводниковой пластины, поэтому их геометрические размеры и магнитоэлектрические параметры практически одинаковы. Вследствие этого обеспечивается полная идентичность удельных магнитных чувствительностей обеих пластин ($\gamma_1 = \gamma_2$), а значит, и тождественность выходных сигналов при измерениях однородных магнитных полей.

Для измерения составляющих градиента ΔB_c средних и сильных полей с магнитной индукцией, равной десятым долям теслы и больше, могут использоваться монолитные магниторезисторы, размещенные в любые два соседних плеча мостовой схемы, в диагональ которой включен измерительный прибор. При этом оба магниторезистора обычно отбираются из одной технологической партии, что обеспечивает идентичность их характеристик. Малые габариты магниторезисторов и специфика их конструкций позволяют расположить их весьма близко друг от друга, что дает возможность измерять очень большие градиенты.

Для измерения составляющих градиента ΔB_c слабых полей с магнитной индукцией, равной десятым долям миллитеслы и меньше, могут использоваться тонкопленочные магниторезисторные мосты или специализированные магниторезисторные ИС (например, серии НМС фирмы Honeywell). На рис. 6.62 приведена электрическая схема градиентометра, реализованного с использованием магниторезисторных ИС типа НМС 2002 [47].

Наиболее действенным методом снижения погрешности измерения магнитной индукции, обусловленной наличием ее градиентов, является уменьшение геометрических размеров магниточувствительных элементов, повышение их магнитной чувствительности и использование планарных многоэлементных линейных и матричных магниточувствительных структур.

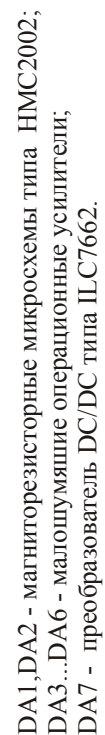


Рис. 6.62. Принципиальная электрическая схема электронного тракта градиентометра, реализованная с применением магниторезисторных микросхем типа HCM 2002

6.5.2. Получение топографии магнитного поля

Для проведения процесса топографии магнитного поля необходимо исследовать всю заданную поверхность контролируемого объекта с последующей визуализацией результатов. Визуализация картины магнитного поля имеет большое значение при контроле качества и структуры ферромагнитных материалов и изделий.

Для того чтобы видеть контролируемую поверхность, необходимо *просканировать*, то есть просмотреть по точкам, контролируемое пространство в большом поле обзора. При этом необходимо найти такой способ сканирования, то есть передвижения мгновенного поля по полю обзора, чтобы перекрыть без пропусков все поле обзора (рис. 6.63).

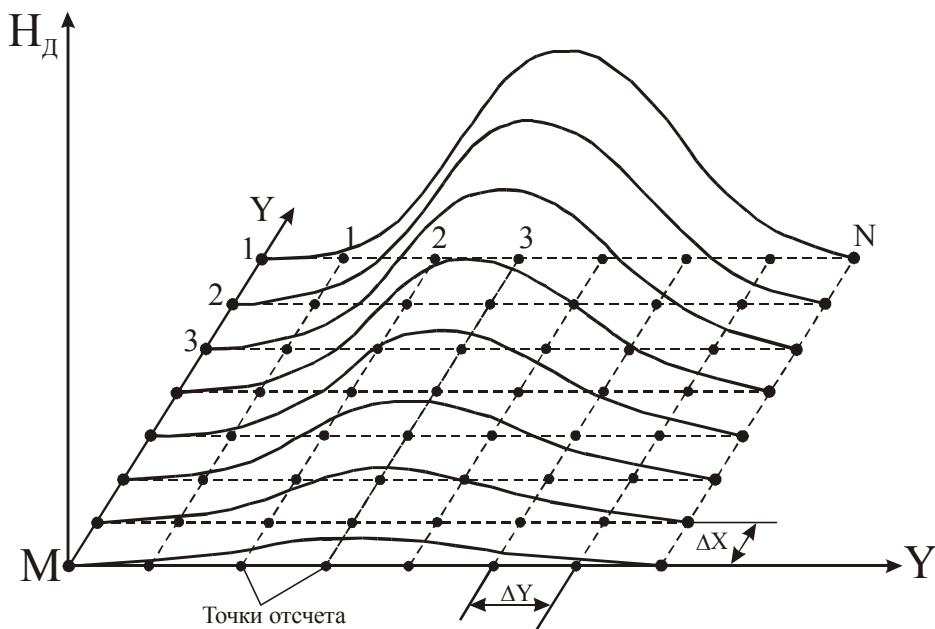


Рис. 6.63. Условная схема расположения точек сканирования вдоль визуализированной поверхности с магнитным рельефом

Считывая магнитный рельеф с определенным шагом Δy и Δx с помощью преобразователей магнитного поля в точках отсчета, соответствующих точкам расположения МЧЭ, система визуализации преобразует полученную информацию в двух- или трехмерное изображение распределения магнитного поля в пространстве в форму, удобную для зрительного восприятия.

Большинство систем топографии используют прямоугольный растр, сканируя поле обзора строка за строкой, как в телевидении. В нашем случае наиболее приемлемым является способ механического сканирования, то есть параллельного перемещения МЧЭ относительно контролируемой поверхности по определенному закону. Для этих целей могут использоваться одноэлементные ПМП (рис. 6.64) и многоэлементные преобразователи магнитного поля.

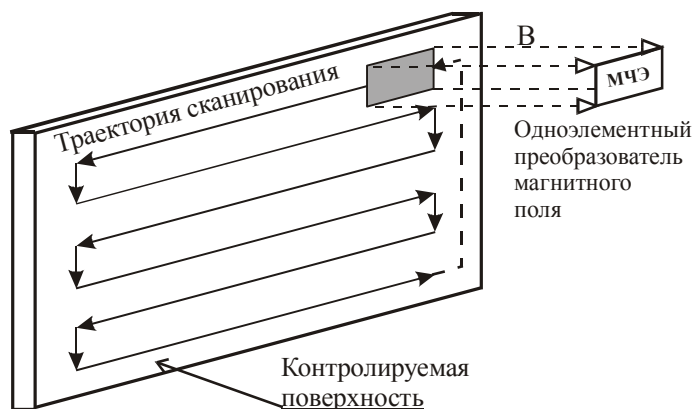


Рис. 6.64. Сканирование поверхности объекта при помощи одноэлементного преобразователя магнитного поля

При использовании линеек магниточувствительных элементов (рис. 6.65) одно сканирование сразу дает столько строк, сколько МЧЭ в линейке.

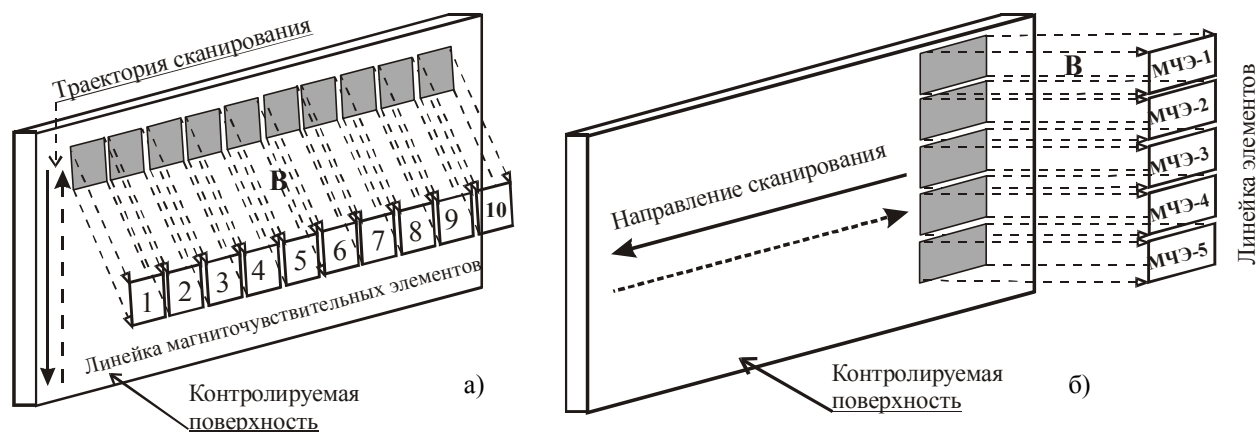


Рис. 6.65. Сканирование поверхности объекта при помощи: а – продольной; б – поперечной линейки ПМП

При использовании матрицы магниточувствительных элементов (рис. 6.66), за одно сканирование просматривается площадь объекта, соизмеримая с площадью матрицы МЧЭ.

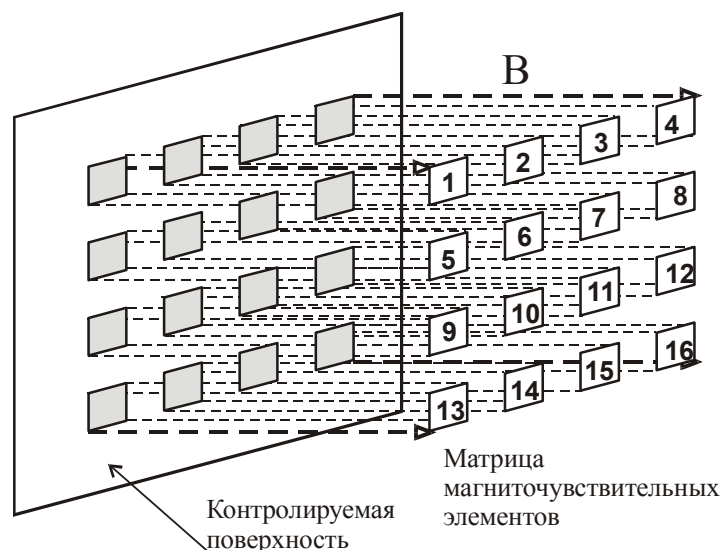


Рис. 6.66. Сканирование поверхности объекта при помощи матричного ПМП

Матрица (рис. 6.66), то есть двумерный набор МЧЭ, позволяет перекрыть определенное поле обзора без механического перемещения. В результате все поле обзора наблюдается постоянно, что является существенным преимуществом матрицы и что особенно важно при наблюдении объектов, изменяющих локально свои параметры в процессе исследований. Применение матрицы упрощает систему сканирования, однако электроника в этом случае становится сложнее. Для получения необходимой пороговой чувствительности каждый МЧЭ должен иметь свой предусилитель, позволяющий повысить уровень сигнала настолько, чтобы его можно было использовать для последующей обработки.

Каждый из приведенных на рис. 6.64–6.66 вариантов сканирования имеет преимущества и недостатки, которые учитываются при проектировании магнитоэлектронной техники и подробно анализируются в специальной литературе [1, 3, 4, 14, 17].

В отличие от оптических систем визуализации информации в приборах магнитной топографии затруднено использование традиционных оптических элементов, поэтому наибольшее распространение получили системы механического сканирования с перемещением ПМП параллельно контролируемому объекту. Время кадра – это время, необходимое для того, чтобы один раз просканировать поле обзора.

На рис. 6.67 приведена упрощенная функциональная схема магнитного топографа с использованием одноэлементного ПМП.

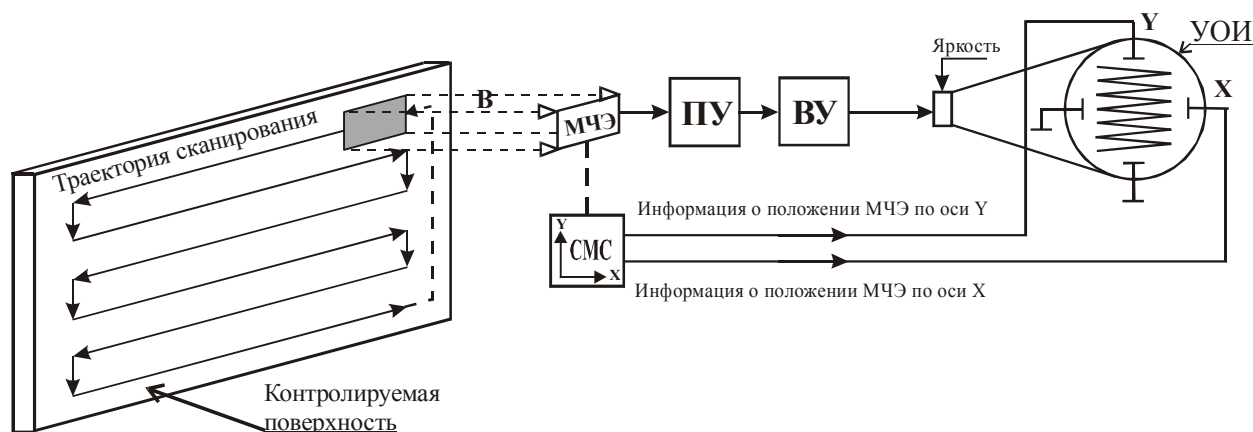


Рис. 6.67. Упрощенная функциональная схема магнитного топографа с использованием одноэлементного ПМП: МЧЭ – магниточувствительный элемент; СМС – система механического сканирования; ПУ – предварительный усилитель; ВУ – схема формирования видеосигнала; УОИ – устройство обработки и отображения информации

Принцип действия магнитного топографа достаточно прост и не требует особых пояснений. Система механического сканирования (СМС) обеспечивает последовательное перемещение МЧЭ параллельно контролируемой поверхности с контролем координат перемещения по осям X и Y. Сигнал с МЧЭ усиливается предусилителем (ПУ), обрабатывается схемой формирования видеосигнала (ВУ) и поступает на устройство обработки и отображения информации (УОИ). Информация о координатах МЧЭ вырабатывается специальными датчиками положения (на рис. 6.67 не показаны).

Индукция магнитного поля в общем виде может определяться выражением:

$$B \equiv \frac{1}{D^2} \quad (6.13)$$

где D – расстояние от плоскости контролируемой поверхности до поверхности магниточувствительного элемента.

К недостаткам этой схемы (рис. 6.67) относятся значительное время обзора полного кадра и невозможность регистрации быстротекущих изменений параметров магнитного поля.

На рис. 6.68 приведена упрощенная функциональная схема магнитного топографа с использованием линейки ПМП.

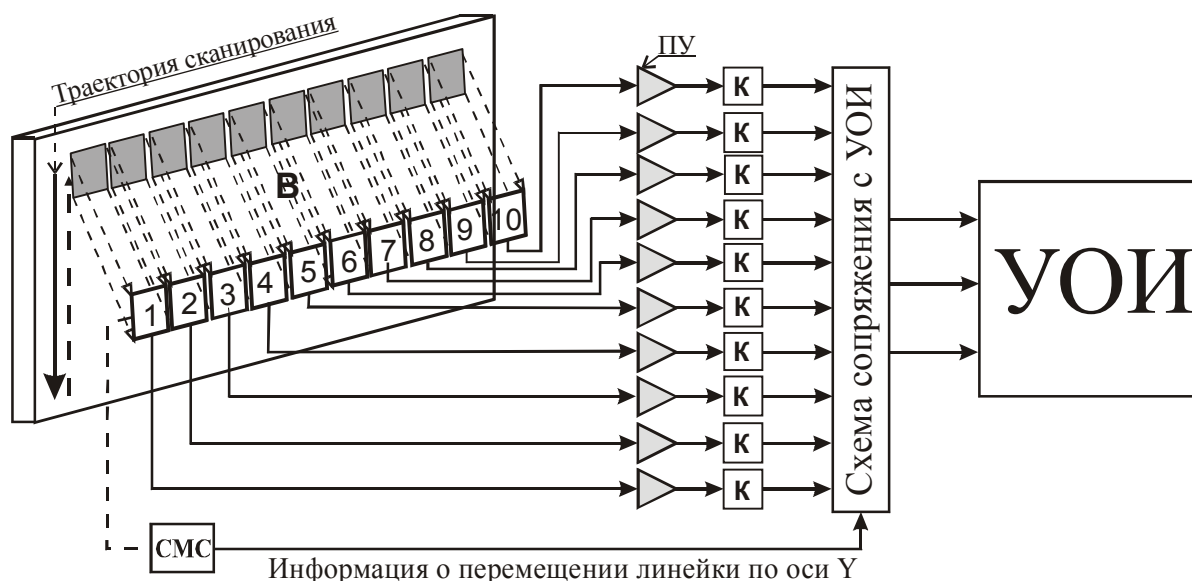


Рис. 6.68. Упрощенная функциональная схема магнитного топографа с использованием линейки ПМП: 1–10 – магниточувствительные элементы; СМС – система механического сканирования; ПУ – предварительный усилитель; К – компараторы; УОИ – устройство обработки и отображения информации; схема сопряжения с УОИ

Матрица с магнитотранзисторами может реализовываться в разных вариантах: ячейки с двумя МОП транзисторами, которые, взаимодействуя, образуют логическую схему, и ячейки с тремя МОП транзисторами. Применение матричного преобразователя на основе магнитодиодов или магнитотранзисторов дает возможность на 1–2 порядка повысить чувствительность преобразователя магнитного поля, по сравнению с традиционными преобразователями на элементах Холла (см. главу 4).

При контроле больших поверхностей применение магниточувствительных матричных преобразователей магнитного поля позволяет одновременно использовать электронное и механическое сканирование. Это значительно сокращает время обзора кадра и повышает разрешающую способность аппаратуры.

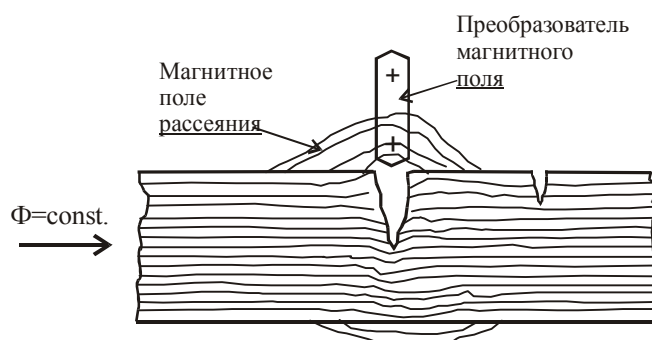
6.6. МЭУ в аппаратуре для неразрушающего контроля изделий

В последние годы все большее распространение находят магнитоэлектронные устройства, предназначенные для диагностики состояния изделий, изготовленных из ферромагнитных материалов: стальных листов, труб, резервуаров и др.

Принцип действия таких устройств заключается в обнаружении аномальных изменений напряженности магнитного поля рассеяния вблизи дефектов. При этом объект контроля, как правило, подмагничивается магнитным полем постоянной величины. Таким образом могут обнаруживаться трещины, раковины, немагнитные включения и другие дефекты.

На рис. 6.71 показан характер изменения магнитного поля в районе трещины.

Рис. 6.71. Характер изменения магнитного поля в районе трещины



Обычно магнитное поле рассеяния в районе дефектов для большинства практических применений составляет приблизительно от 0,001 до 20 мТл. Для регистрации таких полей требуются высокочувствительные магнитоэлектронные приборы с высоким геометрическим разрешением. В таких приборах, как правило, в качестве МЧЭ в основном используются элементы Холла, магнитотранзисторы или тонкопленочные магниторезисторы, вмонтированные в специальные магнитные системы, так как приборы с преобразователями магнитного поля иных типов обладают существенными недостатками.

Феррозондовые магнитометры, например, представляют собой очень чувствительные устройства для измерения полей, напряженность которых одного порядка с магнитным полем Земли. Однако размер практических чувствительных феррозондов, как правило, в значительной степени превышает аномалии потока рассеяния остаточного магнитного поля, которые необходимо выявить. В связи с этим пространственное разрешение приборов оказывается неудовлетворительным.

В протонных магнитометрах на ядерном магнитном резонансе со свободной прецессией спинов, которые широко используются для проведения геомагнитных исследований, существует та же самая проблема, поскольку, несмотря на великолепную чувствительность этих приборов, их чувствительный элемент может иметь объем, достигающий до 1 литра. Следовательно, этими магнитометрами можно пользоваться в относительно однородных полях.

Ниже приводится описание нескольких магнитоэлектронных устройств, используемых для дефектоскопии изделий из ферромагнитных материалов.

6.6.1. МЭУ для неразрушающего контроля изделий

Магнитоэлектронное устройство для дефектоскопии стальных труб, реализованное с применением элементов Холла

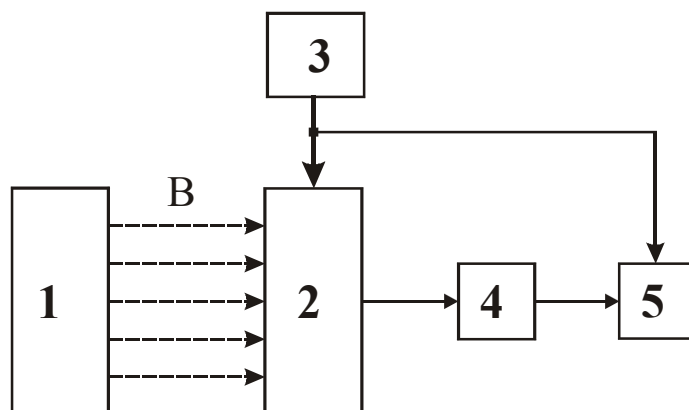
В работе [6] дано описание магнитоэлектронного устройства для дефектоскопии стальных труб. К прибору предъявлялись следующие требования:

- измерение разностей магнитных полей от дефектов с размерами, достигающими до 1 см;
- разрешение разностей магнитных полей до 4×10^{-6} Тл при наличии внешних полей с напряженностью до 10^{-3} Тл;
- хорошее подавление шумов;
- малая потребляемая мощность, что необходимо для работы от автономных источников питания.

Исходя из перечисленных требований, в основу прибора положен метод измерения индукции рассеянного магнитного поля. В качестве ПМП была предложена дифференциально соединенная пара элементов Холла с питанием по переменному току и с применением синхронного детектирования при обработке сигнала.

Принцип действия магнитного топографа (рис. 6.68) не требует особых пояснений. Система сканирования СМС обеспечивает последовательное построчное перемещение линейки ПМП параллельно контролируемой поверхности по оси Y с контролем координат перемещения. Информация о координатах линейки вырабатывается специальным датчиком положения. Сигнал с линейки МЧЭ поканально усиливается предусилителями (ПУ), формируется компараторами и поступает на схему сопряжения, а затем визуализируется устройством обработки и отображения информации. Схема (рис. 6.68) обладает высоким быстродействием.

Рис. 6.69. Функциональная схема матричного преобразователя магнитного поля: 1 – объект контроля; 2 – магнитоприемное устройство; 3 – блок развертки; 4 – амплитудный селектор; 5 – видеоконтрольное устройство (ВКУ)



В работах [2, 10] дано описание матричного преобразователя магнитных полей к *структроскопу*, а на рис. 6.69 приводится его функциональная схема.

Преобразователь состоит из магнитоприемного устройства 2, блока развертки 3, амплитудного селектора 4, выход которого соединен с входом видеоконтрольного устройства 5, и адресных шин X и Y . Магнитоприемное устройство 2 выполнено в виде матрицы магнитодиодов с параллельно подключенными к ним накопительными конденсаторами (рис. 6.70.а).

Принцип действия преобразователя заключается в следующем. Подвергающийся контролю объект 1, создающий неоднородное магнитное поле, устанавливается вблизи магнитоприемного устройства 2. Под действием магнитного поля происходит изменение напряжения на магнитодиодах, определяемое величиной индукции магнитного поля.

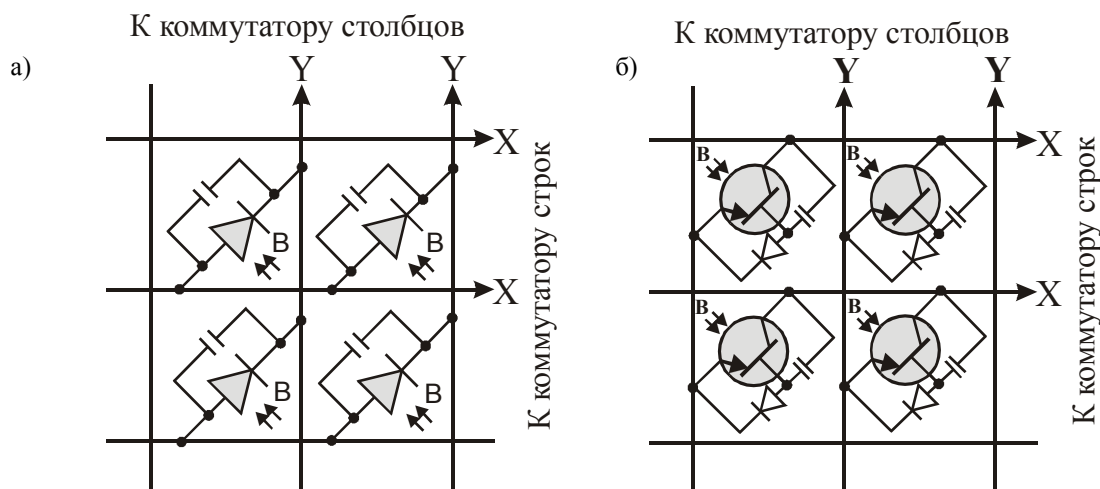


Рис. 6.70. Матричное магнитоприемное устройство: а – на магнитодиодах; б – на магнитотранзисторах

Для получения максимальной чувствительности устройства используется *принцип накопления*. В этом случае ток видеосигнала, поступающий от каждого магнитодиода, пропорционален полному магнитному потоку, действующему на магнитодиод за полный период между коммутациями, то есть за время кадра. Каждый конденсатор, шунтирующий магнитодиод, в момент коммутации заряжается максимально, а между коммутациями начинает разряжаться до напряжения, зависящего от индукции магнитного поля, действующего на магнитодиод, и, следовательно, от сопротивления магнитодиода (см. главу 4).

Блок развертки 3 с помощью адресных шин X и Y последовательно через амплитудный селектор 4 подключает магнитодиоды к входу видеоконтрольного устройства 5. В то же время блок 3 проводит синхронную развертку луча на экране видеоконтрольного устройства 5, яркость светового пятна которого регулируется с помощью амплитудного селектора 4. Полученная на экране ВКУ картина будет соответствовать магнитному рельефу исследуемого объекта и характеризовать его структуру [2].

Магнитоприемное устройство может быть выполнено и в виде матрицы из магнитотранзисторов (рис. 6.70.б), обеспечивающих более высокую амплитуду сигнала на выходе.

Упрощенная функциональная схема дефектоскопа приведена на рис. 6.72, а принципиальная электрическая схема – на рис. 6.73.

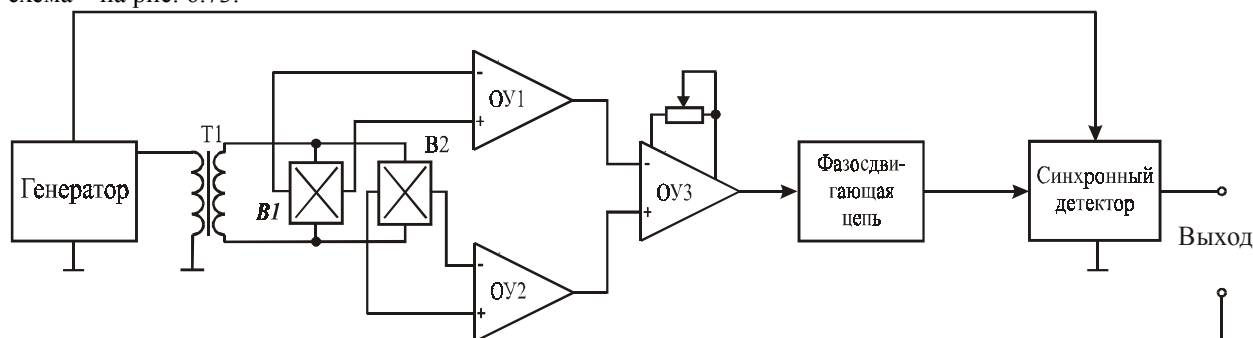


Рис. 6.72. Упрощенная функциональная схема прибора для диагностики состояния стальных труб

Функциональная схема прибора (рис. 6.72) не требует особых пояснений. В этом приборе производится измерение разностей индукции магнитных полей двумя элементами Холла, разнесенными на расстояние 1,5 см. В зависимости от выбранной чувствительности полный размах сигнала на выходе прибора составляет ± 5 В, что соответствует разности магнитных полей в точке контроля ± 2 , ± 5 или ± 20 мТл в зависимости от установленного диапазона.

Элементы Холла В1 и В2 питаются переменным током. При наличии магнитного поля формируется синусоидально изменяющееся напряжение Холла, которое измеряется с помощью дифференциальных усилителей ОУ1 и ОУ2. Разность между двумя напряжениями Холла определяется с помощью дифференциального усилителя ОУ3, имеющего большой коэффициент усиления. С помощью синхронного детектора этот сигнал переменного тока преобразуется в выходной сигнал постоянного тока и может измеряться соответствующими приборами.

Рабочая частота описываемого прибора составляет 10 кГц. Эта частота дает возможность обеспечить фильтрацию выходного уровня постоянного тока без уменьшения чувствительности устройства в отношении небольших дефектов при типовой скорости сканирования 15 км/час (4,2 м/с).

Для рассматриваемого прибора были использованы элементы Холла типа ВН700 фирмы F.W.Bell, отобранные из одной и той же технологической партии, с минимальными напряжениями рассогласования. При этом небольшое напряжение рассогласования ($U_0 < 350$ мкВ) для каждого ЭХ было одинаковым по величине и по фазе, благодаря чему при нулевом поле на выходе присутствовал крайне незначительный сигнал.

Необходимо отметить, что напряжение рассогласования может быть синфазным с током, протекающим через ЭХ, и сдвинутым относительно этого тока на 180° .

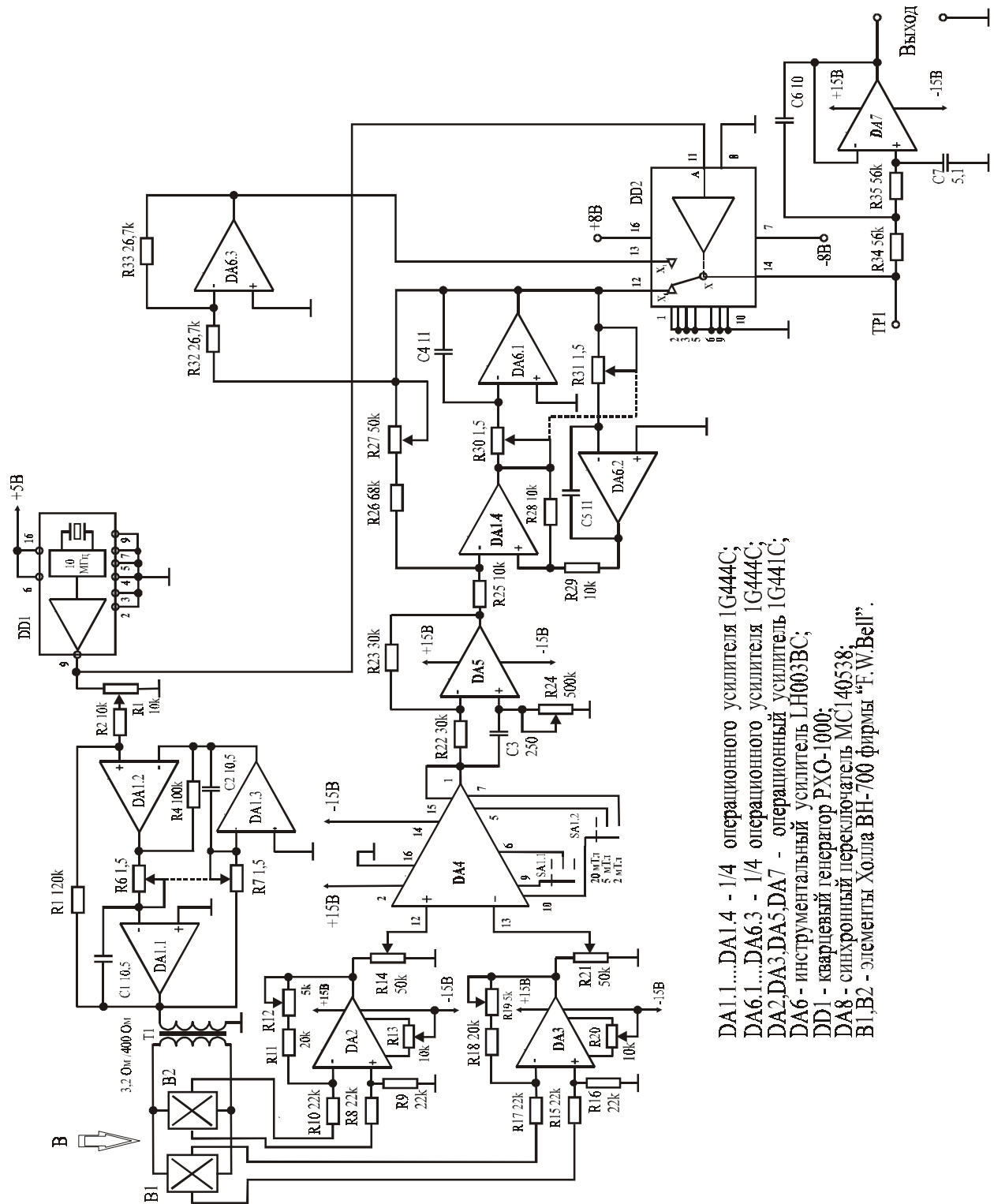
В зависимости от требуемой чувствительности и допустимого смещения нуля в конкретном случае может потребоваться либо тщательная подборка элементов Холла, либо компенсация напряжения рассогласования на дифференциальном усилителе. При использовании элементов Холла с неодинаковыми напряжениями рассогласования и при отсутствии каких-либо мер, направленных на компенсацию напряжения рассогласования электронным способом, результатом была бы нестабильность выходного напряжения постоянного тока.

Рабочий ток элементов Холла определяется параметрами согласующего трансформатора. Выбор этого трансформатора требует компромисса между приведением к максимуму импеданса с выходной стороны генератора (с целью увеличения эффективности возбуждения) и тока управления элементов Холла (с целью увеличения чувствительности ЭХ).

Увеличение импеданса с выходной стороны генератора ведет к тому, что в нагрузку поступает большая мощность генератора. Увеличение импеданса с выходной стороны генератора эквивалентно увеличению коэффициента трансформации согласующего трансформатора, поскольку входной импеданс преобразователя Холла есть величина постоянная. При увеличении коэффициента трансформации согласующего трансформатора уменьшается рабочий ток элементов Холла, что приводит к уменьшению магнитной чувствительности последних. Следовательно, оптимальный коэффициент трансформации определяется с учетом указанных противоречивых требований.

Электрическая схема дефектоскопа (рис. 6.73) содержит источник переменного тока для питания ЭХ, который состоит из кварцевого генератора, объединенного в одном корпусе с DD1 кварцем и КМОП интегральной схемой), полосового фильтра и согласующего трансформатора. Частота колебаний кварцевого генератора составляет 1 МГц. Благодаря имеющейся в интегральной схеме КМОП логике эта частота уменьшается до 10 кГц.

Основная составляющая этих прямоугольных колебаний с частотой 10 кГц выделяется с помощью полосового фильтра (на элементах DA1.1, DA1.2 и DA1.3) с центральной частотой 10 кГц и полосой пропускания 800 Гц. Этот фильтр обеспечивает усиление возбуждающего сигнала и позволяет избежать проблем, возникающих при возбуждении индуктивной нагрузки с помощью КМОП генератора. Поскольку элементы Холла имеют низкое входное сопротивление – около 4 Ом, – согласующий трансформатор Т1 обеспечивает высокоомную нагрузку для генератора.



DA1.1....DA1.4 - 1/4 операционного усилителя 1G444C;
 DA6.1....DA6.3 - 1/4 операционного усилителя 1G444C;
 DA2,DA3,DA5,DA7 - операционный усилитель 1G441C;
 DA6 - инструментальный усилитель LH003BC;
 DD1 - кварцевый генератор РХО-1000;
 DA8 - синхронный переключатель MC140538;
 B1, B2 - элементы Холла ВН-700 фирмы "F.W.Bell".

Рис. 6.73. Принципиальная электрическая схема электронного тракта дефектоскопа

Трансформатор Т1 с коэффициентом трансформации $n = 35$ обеспечивает среднеквадратичную величину тока возбуждения порядка 45 мА для каждого из параллельно соединенных элементов Холла. При таком уровне возбуждения выходная чувствительность ЭХ в среднеквадратичном значении составляет 140 мВ/Тл.

Напряжение сигнала с элементов Холла В1, В2 измеряется дифференциальными усилителями DA2, DA3 с единичным коэффициентом усиления. Эти усилители соединены в одном и том же направлении, так что при наличии одного и того же поля на обоих преобразователях и при отсутствии напряжений рассогласования разность между двумя сигналами равна нулю.

Разность между двумя напряжениями Холла измеряется с помощью программируемого инструментального усилителя DA4, работающего в режиме дифференциального усилителя. В зависимости от выбранной чувствительности переключателем SA1 обеспечивается точное и устойчивое усиление с коэффициентами 100, 400 или 1000. Переменные резисторы R14, R21, включенные между усилителями DA2, DA3 и усилителем нахождения разности DA4, предназначены для компенсации неравномерности чувствительностей элементов Холла В1, В2.

Усиленный разностный сигнал измеряется с помощью синхронного детектора, который содержит полосовой фильтр (DA1.4, DA6.1, DA6.2), инвертор DA6.3, синхронный переключатель DD2 и низкочастотный фильтр DA7. Полосовой фильтр обеспечивает уменьшение шумов по напряжению Холла переменного тока и устранение смещения напряжения по постоянному току. Его полоса пропускания имеет ширину 1 кГц с центром на частоте возбуждения, то есть на частоте 10 кГц.

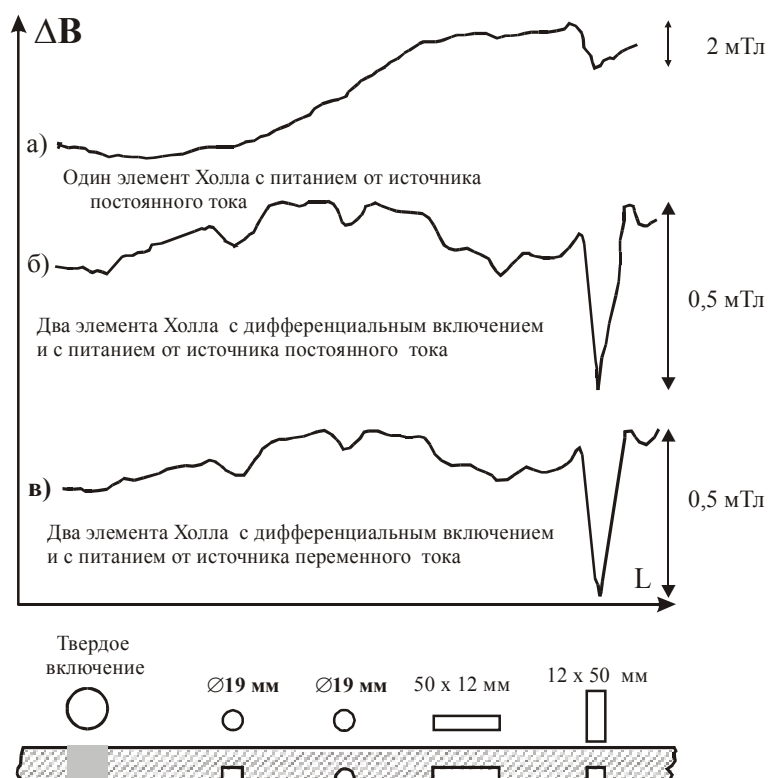
Детектирование амплитуды сигнала переменного тока производится за счет синхронного двухполупериодного выпрямления, для чего с помощью сигнала кварцевого генератора обеспечивается управление состоянием КМОП переключателя DD2. Этот переключатель выбирает либо отфильтрованный сигнал, либо тот же сигнал в инвертированном виде.

На выходе переключателя низкочастотный фильтр с частотой сопряжения 400 Гц обеспечивает сглаживание результирующего сигнала. Этот фильтр определяет самую высокую частоту, на которой на выходе прибора будут отслеживаться изменения во входных магнитных полях. Полоса пропускания синхронного детектора составляет приблизительно 640 Гц.

Схема фазового опережения DA5 обеспечивает регулируемый фазовый сдвиг в пределах от 0 до 180°. Максимум чувствительности по выходу выставляется в процессе подготовки прибора к работе регулированием фазового сдвига, для чего предназначена контрольная точка, обозначенная на рис. 6.73 как TP1, на которую выведен симметричный выпрямленный по двухполупериодной схеме сигнал [6].

На рис. 6.74 приведены результаты сканирования магнитных потоков рассеяния на внутренней стороне намагниченной стальной трубы с несколькими специально выполненными глухими отверстиями и прорезями, имитирующими наружную коррозию.

Рис. 6.74. Результаты сканирования магнитных потоков рассеяния на внутренней стороне намагниченной стальной трубы с применением различных вариантов включения элементов Холла: а – один элемент Холла с питанием от источника постоянного тока; б – два элемента Холла с дифференциальным включением и с питанием от источника постоянного тока; в – два элемента Холла с дифференциальным включением и с питанием от источника переменного тока



На рис. 6.74.а представлен простой график составляющей поля в радиальном направлении, полученный с одним элементом Холла. В сравнении с большим основным полем трубопровода, который действует как стержневой магнит, сигналы от дефектов являются очень маленькими.

График на рис. 6.74.б получен как разность между парой согласованных элементов Холла с усилением по постоянному току.

Кривая на рис. 6.74.в относится к случаю с использованием дифференциальных элементов Холла с усилением по переменному току. Как и в предыдущем случае, вновь получены великолепные сигналы от дефектов.

Поскольку данные получены в лабораторных условиях при практически полном отсутствии шумов, результаты по ЭХ с усилением по переменному и постоянному току являются почти одинаковыми. При проведенных краткосрочных проверочных испытаниях дрейф в усилителе постоянного тока был очень малым.

Рассмотренный выше вариант принципиальной схемы дефектоскопа обладает определенными недостатками, к которым можно отнести значительный ток потребления (по цепи питания ЭХ – более 45 мА) и недостаточно высокую магнитную чувствительность.

Элементы Холла с усилением по переменному току в дифференциальной схеме можно с успехом использовать и для измерения рассеяния в остаточном магнитном поле.

При контроле трубопроводов преобразователи с усилением по переменному току – в сравнении с дифференциальными ЭХ с усилением по постоянному току – обладают определенными преимуществами, а именно: обеспечивают, благодаря синхронному детектированию, повышенные отношения сигнал/шум, легко адаптируются к работе от батарейных источников питания [6].

Электронный тракт дефектоскопа, реализованный с применением полевых элементов Холла

Эксплуатационные параметры дефектоскопа, схема которого показана на рис. 6.73, можно улучшить, если в качестве ПМП применить полевые элементы Холла. На рис. 6.75 приведена электрическая схема подобного устройства. В качестве преобразователя магнитного поля в данном устройстве используется полевой элемент Холла (ПДХ типа FEHS-02), отличающийся малым током управления (до 0,5 мА) и возможностью модуляции входного сигнала.

Рассмотрим назначение элементов принципиальной схемы на рис. 6.75.

Полевой элемент Холла типа FEHS-02 с размером чувствительной области 0,5×0,5 мм питается от источника тока, выполненного на операционном усилителе DA4.

Сигнал с ЭХ поступает на входы дифференциального усилителя DA1, в качестве которого используется малощумящий микромощный инструментальный усилитель типа INA-118P. Коэффициент усиления устанавливается резистором R9 в пределах от 500 до 1000. Переменные многооборотные резисторы R6 и R7 служат для предварительной балансировки схемы по постоянному напряжению.

Микросхемы DA2 и DD2 представляют собой синхронный детектор, управляемый от генератора, выполненного на таймере KP1006BI1 (DD1). Этот же генератор является источником модулирующего напряжения для полевого элемента Холла.

Частота модуляции определяется экспериментально (в пределах 1000–10000 Гц) по максимальному отношению сигнал/шум, контролируемому на выходе микросхемы DA2. Частота модуляции устанавливается резистором R11. Напряжение с выхода DA2 поступает на вход амплитудного детектора DA3.

Измерение выходного сигнала производится прибором P1, в качестве которого используется микроамперметр типа M285K с пределом измерений 100 мкА или аналоговый самописец любого типа. Конденсатор C7 определяет постоянную времени регистрирующего прибора.

Схема питается от автономного двухполярного источника питания с напряжением 12В через интегральный стабилизатор DA4. Ток, потребляемый всем устройством, не превышает ±30 мА. Устройство обладает достаточно высоким порогом чувствительности, который составляет 10^{-6} Тл при отношении сигнал/шум, равном 1.

В случае необходимости в данном устройстве могут быть использованы двухэлементные ПДХ в дифференциальном включении, с подачей напряжения их сигнала на разные входы усилителя DA1.

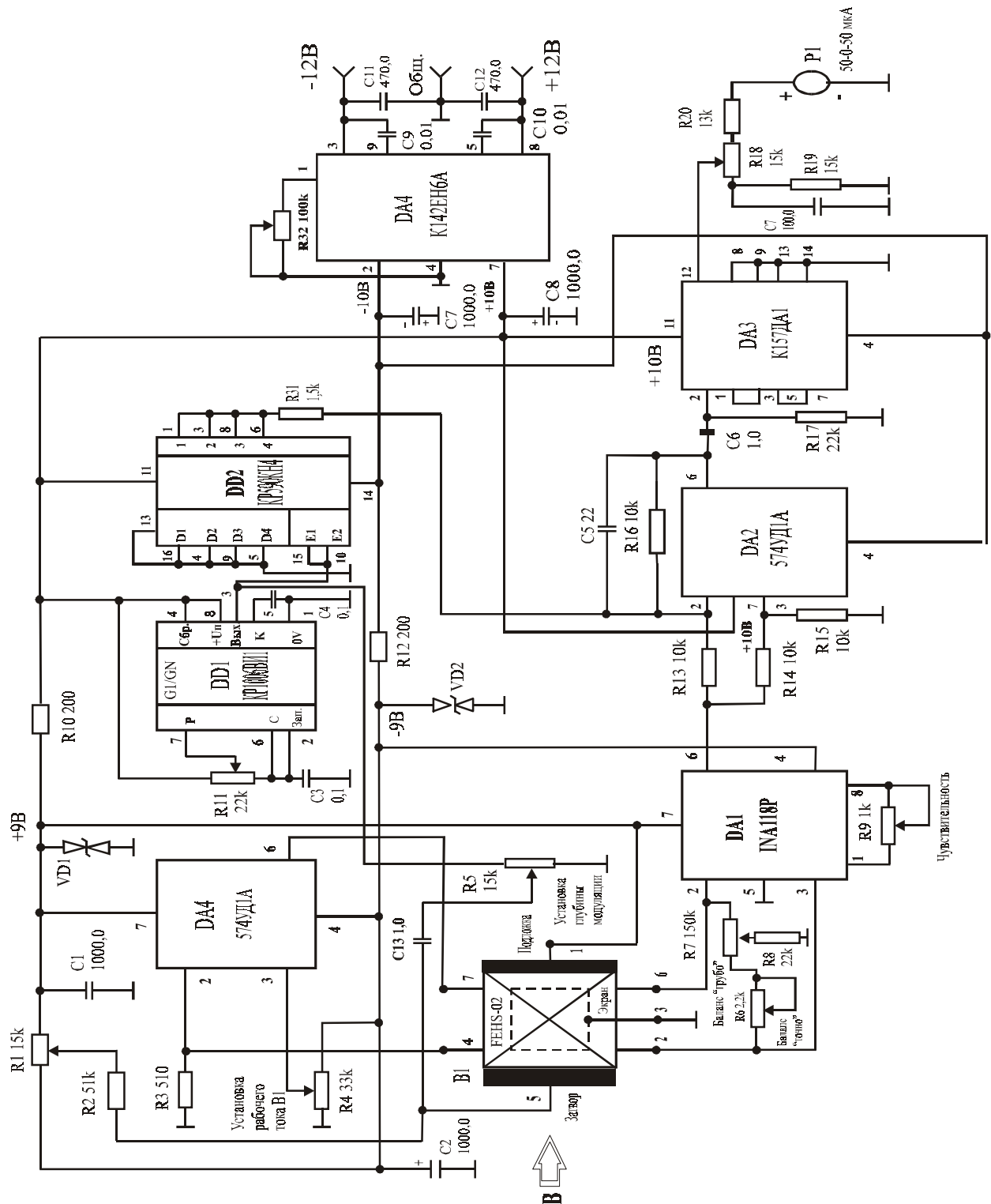


Рис. 6.75. Принципиальная электрическая схема электронного тракта дефектоскопа, реализованная с применением полевого элемента Холла

Магнитоэлектронное устройство для дефектоскопии стальных канатов, реализованное с использованием элементов Холла

Еще одним примером использования магнитоэлектронных устройств является их применение для дефектоскопии стальных канатов, которые используются во многих областях народного хозяйства (на канатных дорогах, в горной промышленности, в подъемно-транспортных машинах, лифтах и др.), а потому контроль их состояния имеет важное значение. Для контроля состояния несущих и тяговых канатов, применяемых на канатных дорогах, а также подъемных канатов обычно используются электромагнитные приборы, основанные на магнитоиндукционном методе обнаружения оборванных проволок и на индуктивном методе контроля рабочего сечения стальных канатов.

Принцип действия большинства приборов, контролирующих рабочее сечение канатов, основан на зависимости индуктивности катушки искателя от сечения стального каната. Индуктивный искатель включен в одно из плеч измерительного резонансного моста переменного тока. Измерительный мост балансируется при установке индуктивного искателя на неизношенном участке исследуемого каната.

Вокруг каната на этом участке появляется магнитное поле рассеяния. При перемещении магнитной системы с искателем вдоль бездефектного каната с выхода искателя снимается постоянный сигнал, обусловленный равномерно распределенным вдоль каната полем рассеяния.

Прохождение через индуктивный искатель участка каната с уменьшенным сечением приводит к разбалансу измерительного моста. Напряжение разбаланса поступает на вход усилителя регистрирующего устройства, проградуированного в процентах потери сечения контролируемого каната. Прибор, построенный на описанном принципе, не является универсальным и предназначен для исследования только подъемных канатов в горной промышленности, так как его конструкция не позволяет преодолевать опоры на подвесных канатных дорогах [29].

Работа другого типа приборов для обнаружения обрыва проволок в стальных канатах основана на фиксации полей рассеяния, подвергающихся изменению у оборванных проволок намагниченного каната. Принцип действия таких приборов заключается в следующем. Магнитное поле, создаваемое магнитной системой, намагничивает участок каната, заключенный между полюсами магнита. При этом вокруг исследуемого участка каната появляются малые поля рассеяния. Чувствительный элемент искательного устройства, расположенный в середине между полюсами и охватывающий канат, выполнен в виде индукционных катушек. Магнитная система и искательное устройство жестко связаны между собой, благодаря чему вдоль каната перемещается как магнитная система, так и чувствительный элемент. Относительное перемещение поля рассеяния и чувствительного элемента отсутствует. Поэтому на выходе искательного устройства при бездефектном канате сигнала нет.

При наличии обрыва проволок в канате на месте дефекта снаружи каната происходит деформация поля рассеяния, которое в момент прохождения искательным устройством места дефекта приводит к возникновению импульса ЭДС в индукционных катушках. Этот импульс усиливается, а затем с помощью регистрирующего устройства записывается на бумажной ленте, таким образом искательное устройство дефектоскопа реагирует на изменение характера магнитного поля рассеяния в месте повреждения, воспринимая это изменение как приращение магнитного потока на единицу длины каната при постоянной скорости перемещения искателя.

Существенным недостатком рассмотренного дефектоскопа является то, что появление сигнала на выходе искательного устройства возможно только при перемещении искателя или исследуемого каната относительно искателя. Поскольку в момент остановки сигнал дефекта исчезает, то возможность точного определения места повреждения при этом затруднена.

Более перспективным представляется использование элементов Холла для суждения о характере поля рассеяния вдоль каната, а следовательно, о наличии и характере дефекта. Элемент Холла позволяет регистрировать магнитные поля рассеяния вне зависимости от скорости перемещения преобразователя вдоль каната. Вместе с тем появляется необходимость отстроиться от составляющей постоянного поля рассеяния, поскольку преобразователь Холла чувствителен к величине индукции магнитного поля, а не к его производной [29].

В системе АН ГрССР [29] был разработан и испытан в лабораторных и промышленных условиях дефектоскоп стальных канатов на элементах Холла. Дефектоскоп состоит из магнитной системы с искателем на преобразователях Холла, усилителя выходного сигнала искателя, регистратора сигналов и источников питания для усилителя и искателя. Конструкция искателя изображена на рис. 6.76.

Устройство функционирует следующим образом. Магнитное поле, создаваемое магнитной системой, намагничивает контролируемый участок каната, находящийся между полюсами постоянного магнита. Вокруг каната на этом участке появляется магнитное поле рассеяния. При перемещении магнитной системы с искателем вдоль бездефектного каната с выхода искателя снимается постоянный сигнал, обусловленный равномерно распределенным вдоль каната полем рассеяния.

Этот сигнал компенсируется таким образом, что на выходе искателя при бездефектном канате сигнал отсутствует. При обрыве проволок в канате в зоне дефекта происходит деформация магнитного поля рассеяния. Изменение поля рассеяния приводит к разбалансу схемы компенсации и появлению сигнала на выходе искателя.

Так как ток управления элементами Холла поддерживается неизменным, то выходной сигнал зависит только от индукции магнитного поля рассеяния снаружи каната, характер изменения которого определяется дефектом в канате. Таким образом, сигнал на выходе искателя зависит от количества оборванных проволок, но не зависит от скорости перемещения искателя вдоль каната. Этот сигнал, обусловленный наличием дефекта в канате, присутствует как при его перемещении, так и в неподвижном состоянии. Это обстоятельство позволяет остановить искатель на месте дефекта и точно определить место повреждения.

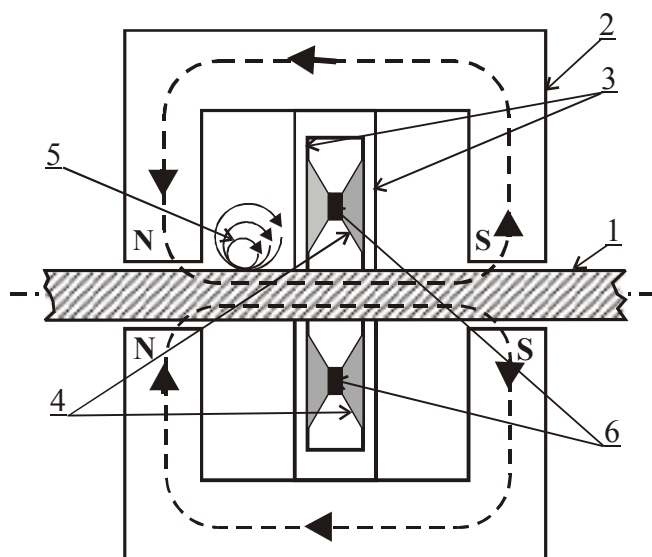


Рис. 6.76. Конструкция искателя дефектоскопа стальных канатов с использованием элементов Холла: 1 – стальной канат; 2 – магнитная система; 3 – концентрирующие кольца; 4 – скосы внутренних стенок колец; 5 – поле рассеяния; 6 – элементы Холла

Магнитные поля рассеяния вдоль каната имеют относительно малые значения (примерно 0,5–15 мТл). Поэтому магнитную чувствительность преобразователей Холла, воспринимающих эти поля, повышают с помощью ферромагнитных концентраторов. Магнитный концентратор состоит из двух концентрирующих колец, в воздушные зазоры которых помещены преобразователи Холла (рис. 6.76). Длина зазора определяется толщиной элемента Холла и должна быть как можно меньше. Для установки концентратора на канате концентрирующие кольца, состоящие из двух полуколец, выполняются разъемными.

Выбор материала концентрирующих колец определяется их назначением и вытекающим из этого основным требованием, которому должен удовлетворять материал. Это прежде всего высокая магнитная проницаемость. Вместе с тем для магнитопроводов с воздушным зазором эффективная магнитная проницаемость зависит от отношения длины воздушного зазора к длине магнитного контура и с ростом этого отношения она сильно падает. При этом значение магнитной проницаемости самого материала уже не играет роли. Поэтому для концентратора описываемой конструкции применение материалов с высокой магнитной проницаемостью, к которым относятся дорогие пермаллоевые сплавы, нецелесообразно. Концентраторы изготовлены из малоуглеродистой термообработанной стали.

Элементы Холла располагаются в воздушных зазорах концентратора равномерно по окружности концентрирующих полуколец. ЭХ по входу (токовые выводы) соединяются параллельно и питаются от общего источника питания. Для питания элементов выбран постоянный управляющий ток, так как он наиболее приемлем в переносных приборах и не усложняет схемы питания. Чтобы лучше сконцентрировать и направить магнитные силовые линии поля рассеяния, возникающие в месте дефекта, на поверхности элементов Холла, края внутренних стенок колец скошены. По выходу элементы соединяются последовательно и согласованно. Остаточное напряжение компенсируется на выходе группы ЭХ при номинальном управляющем токе включением одного компенсирующего резистора между общими токовым и холловскими выводами. Поскольку во время проведения испытания канатов значение управляющего тока остается неизменным, то нарушения компенсации остаточного напряжения от изменения управляющего тока не будет. Для регистрации сигнала дефекта, снимаемого с элементов Холла, сигнал с выхода ЭХ усиливается усилителем постоянного тока [29].

Дефектоскоп, реализованный с применением элементов Холла, обеспечивает возможность контроля канатов как находящихся в эксплуатации (в том числе в труднодоступных местах), так и подлежащих введению в эксплуатацию и не укрепленных на опорах. Подробнее см. [29].

Магнитоэлектронное устройство для дефектоскопии ферромагнитных изделий, реализованное с применением тонкопленочных магниторезисторов

Высокочувствительные тонкопленочные магниторезисторы все чаще начинают использоваться в диагностической аппаратуре и приборах. На рис. 6.77 приведена упрощенная схема использования магниторезисторного моста для обнаружения дефектов в изделиях, изготовленных из ферромагнитных материалов.

В данном устройстве датчик магнитного поля состоит из тонкопленочного магниторезисторного моста KMZ10 и расположенного за ним постоянного магнита. При перемещении такого датчика над поверхностью, например стального листа, содержащего дефект, возникают искажения топологии магнитного поля.

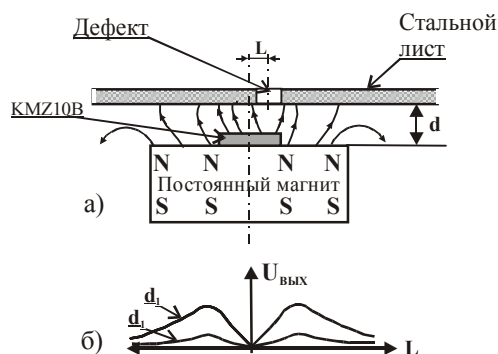


Рис. 6.77. Принцип работы дефектоскопа с использованием тонкопленочного магниторезистора: а – магнитная система; б – характер изменения сигнала

Для усиления и предварительной обработки сигнала может использоваться схема, приведенная на рис. 6.78. Схема не требует особых пояснений.

В схеме на рис. 6.78 регулирования коэффициента усиления обеспечивается переменным резистором R5. Установка напряжения смещения осуществляется при помощи резистора R2. Схема обеспечивает определенную температурную стабилизацию параметров, для чего в ее состав включен терморезистор типа KTY81-120 (R6) с отрицательным ТКС.

Особенностью применения магнитоэлектронного устройства с использованием магнитной системы (рис. 6.77) и схемы (рис. 6.78) является то, что при точном совпадении центра сквозного дефекта с центром магниторезистивного моста сигнал на выходе устройства становится близким к 0. При этом расстояние до объекта d не является критичным. Эта схема особенно эффективна при «нулевых» измерениях.

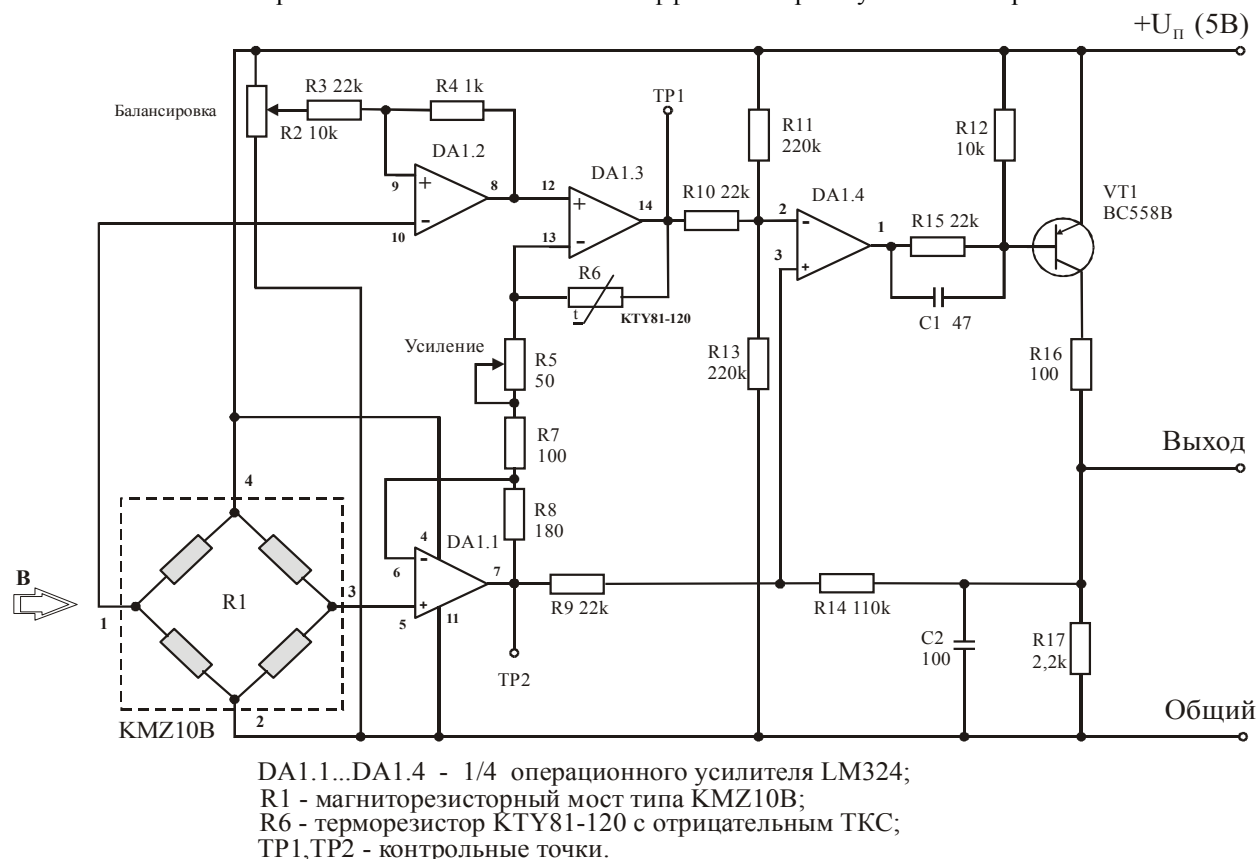


Рис. 6.78. Принципиальная электрическая схема высокочувствительного магнитоэлектронного устройства с использованием тонкопленочного магниторезисторного моста типа КМЗ10В

DA1.1...DA1.4 - 1/4 операционного усилителя LM324;
R1 - магниторезисторный мост типа KMZ10B;
R6 - терморезистор КТУ81-120 с отрицательным ТКС;
TP1, TP2 - контрольные точки.

Следует отметить, что данная конструкция может использоваться при обнаружении точечных дефектов малого размера. Размеры обнаруживаемых дефектов определяются конструкцией и параметрами магнитного датчика. Порог чувствительности магнитоэлектронного устройства составляет примерно $(5-10) \times 10^{-6}$ Тл. [13, 29].

6.6.2. Промышленные образцы МЭУ для неразрушающего контроля

В последние годы в России несколько активизировалась деятельность по разработке, изготовлению и промышленному применению оборудования для неразрушающего контроля изделий и материалов.

Центром «Магнитная диагностика трубопроводов» (г. Обнинск) и ГНЦ «Технологический центр» (г. Зеленоград) создан и успешно эксплуатируется *магнитный интраскоп типа МИ-10*, который предназначен для диагностирования линейной части газонефтепроводов, обсадных и насосно-компрессорных труб скважин, резервуаров.

Диагностирование линейной части газонефтепроводов возможно проводить как при наличии изоляции, так и без нее при капитальном ремонте трубопроводов и при плановом обследовании. Интраскоп может встраиваться во внутритрубные инспекционные снаряды или же располагаться с внешней стороны трубопроводов в шурфах. Объектами контроля интраскопа являются ферромагнитные изделия простой формы типа труб, котлов, резервуаров, рефракционных колонн, трубопроводов, листового проката и т.д.

Принцип действия интраскопа МИ-10 основан на визуализации магнитных полей рассеяния от дефектов, возникающих при намагничивании объектов контроля с помощью передвижных намагничивающих устройств или иным методом, а также при проведении контроля по остаточной намагниченности. При контроле изделий выявляются протяженные дефекты типа нарушения сплошности (коррозионные и усталостные трещины, несплошности, язвы) при толщине стенки объекта до 25 мм.

Основное отличие магнитного интраскопа МИ-10 от известных приборов, реализующих магнитные методы диагностирования, заключается в получении двух- и трехмерных изображений полей рассеяния дефектов на экране персонального компьютера или видеоконтрольного устройства непосредственно в процессе проведения контроля. По изображению определяются форма дефектов, их размеры, ориентация и взаимное расположение. Интраскоп осуществляет цифровую обработку получаемых изображений дефектов и оценивает их геометрические параметры (длину, раскрытие и глубину).

Интраскоп МИ-10 состоит из:

- сканера магнитного поля;
- видеоконтрольного устройства (ВКУ);
- передвижного намагничивающего устройства (НУ) на постоянных магнитах.

В качестве преобразователя магнитного поля в данном интраскопе используются многоэлементные кремниевые магнитотранзисторные линейные структуры, реализованные в интегральном исполнении.

Основные параметры интраскопа МИ-10 приведены в табл. 6.4.

Предприятием «Интрон Плюс» (г. Москва) разработаны и выпускаются измерители износа стальных канатов «ИНТРОС». *Дефектоскоп «ИНТРОС»* состоит из электронного блока и сменных магнитных головок канатов.

Электронный блок дефектоскопа содержит однокристалльный микрокомпьютер и память на 1, 2 или 4 Мбайта для запоминания результатов контроля по каналам потери сечения и локальных дефектов.

Комплект дефектоскопа включает несколько магнитных головок, каждая из которых может быть подключена к нему кабелем.

Дефектоскоп выполняет следующие функции:

- измеряет потерю сечения каната и обнаруживает локализованные дефекты (обрывы проволок, локальную коррозию);
- обеспечивает регистрацию дефектограмм каната и имеет возможность сопряжения через стандартный интерфейс с внешними устройствами обработки и регистрации информации (IBM-совместимый компьютер и принтер);
- позволяет контролировать канаты круглого поперечного сечения диаметром от 6 до 64 мм.

Контроль канатов обеспечивается при скорости движения каната относительно магнитной головки дефектоскопа в диапазоне от 0 до 1 м/с при контроле канатов диаметром от 6 до 20 мм и от 0 до 2 м/с при контроле канатов диаметром от 20 до 64 мм.

В качестве преобразователя магнитного поля в дефектоскопе используются элементы Холла [26, 27, 16]. Основные параметры дефектоскопа «ИНТРОС» приведены в табл. 6.5.

Таблица 6.4. Основные параметры магнитного интраскопа МИ-10

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Значение параметра
1	Раскрытие выявляемых дефектов, мкм, не более	30
2	Толщина стенки контролируемых объектов, мкм, не более	25
3	Глубина залегания выявляемых дефектов, мм	20
4	Глубина выявляемых дефектов (в % от толщины стенки)	20
5	Минимальная длина выявляемых дефектов, мм, не более	5
6	Погрешности измерения длины трещины, %, не более	7
7	Погрешности измерения раскрытия поверхностных и подповерхностных трещин ,	15
8	Погрешности измерения глубины поверхностных и подповерхностных трещин ,	15
9	Точность обработки результатов(определяется погрешностью АЦП сканера), %, не	0,5
10	Разрешающая способность(устанавливается по отдельному заказу), мм	от 0,001 до 2
11	Напряжение питания, В	9
12	Ток потребления, мА, не более	15
13	Магнитная чувствительность, В/(А*см) , не менее	300
14	Производительность, мм/ мин, не менее	1
15	Габаритные размеры ВКУ, мм	160 x 80 x 20
16	Габаритные размеры сканера, мм	100 x 60 x 10
17	Габаритные размеры передвижного гантелеобразного магнита, мм	200 x 200 x 100
18	Габаритные размеры передвижного П-образного магнита, мм	220 x 200 x 200
19	Масса сканера и ВКУ, кг	0,6
20	Масса передвижного П-образного магнита, кг	5
21	Масса передвижного гантелеобразного магнита, кг	5

Таблица 6.5. Основные параметры магнитного дефектоскопа «ИНТРОС»

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип магнитной головки / значение параметра					
		МГ 6 - 24	МГ 20 - 40	МГ 24 - 64	МГ 40 - 64	МГ 124	МГ 233
1	Размеры контролируемых канатов, мм	Ø 6...24	Ø 20...40	Ø24...64	Ø 40...64	Плоские (72-124) x 11,5	Плоские (124-233) x 38
2	Масса головки, кг	3	8	15	15	9	23
3	Размеры головки, мм	235x230x 64	330x205x 190	330x235x 190	330x235x 190	285x220x225	300x152x 325
4	Масса и размеры электронного блока	0,8 кг 230 x 85 x 35 мм					
5	Погрешность измерения потери сечения каната, %	2	1	1	1	2	2
6	Порог чувствительности к обрыву проволок, %	1	1	1	0,5	-	-
7	Скорость контроля, м/с	0...1	0...2	0...2	0...2	0...1	0...1
8	Объем внутренней памяти (длина проконтролированного каната), м	810... 2000	2000... 8000				
9	Время установления рабочего режима, с	не более 5					
10	Диапазон измерения потери сечения каната по металлу, %	0...30					
11	Температура окружающей среды, °С	-10...+40 (-25...+40 по спецзаказу)					
12	Влажность окружающего воздуха, %	95% при 35° С;					
13	Источники питания	3 аккумулятора типа АА					
14	Время работы от одного комплекта источников питания, час	6					
15	Исполнение	Общее или рудничное взрывозащищенное					

6.7. Магнитоэлектронные устройства в экологии и медицине

В конце 70-х годов начались систематические исследования влияния магнитного поля и электромагнитного излучения на человека и окружающую среду. Первые публикации в прессе были очень обширными, и в качестве популярного объяснения этих вездесущих полей было принято слово «смог», производное от англ. *smoke* – дым и туман.

В последние годы за рубежом все большее распространение получает такое понятие, как *электросмог*. Этот термин используется для характеристики влияния магнитных и электромагнитных полей на окружающую среду и человека.

В связи с чрезвычайной важностью влияния электросмога на окружающую среду и здоровье человека в 1992 г. была создана Международная комиссия по защите от неионизирующих излучений в качестве компаньона Международной ассоциации радиационной защиты, были разработаны соответствующие Стандарты Европейского союза.

В природе известны электрическое поле и магнитное как две составляющие электромагнитного поля. Обе эти составляющие части существуют как в природе, так и являются результатом деятельности человека. Разница между этими полями заключается в том, что в большинстве своем естественные поля постоянные, то есть они не меняют полярность. В отличие от этого поля искусственного происхождения переменные, так как они генерируются переменным током.

В международной практике напряженность электрического поля обозначается символом E и измеряется в вольтах на метр (В/м). Напряженность магнитного поля H измеряется в амперах на метр (А/м) или в величинах магнитной индукции B в теслах (Тл) или гауссах (гс).

Понятие о магнитосфере

Огромное влияние на природу и человека оказывает *магнитосфера* – самая внешняя и протяженная оболочка Земли. Это область околоземного пространства, физические свойства которой определяются магнитным полем Земли и его взаимодействием с потоками заряженных частиц. Строение магнитосферы Земли приведено на рис. 6.79.

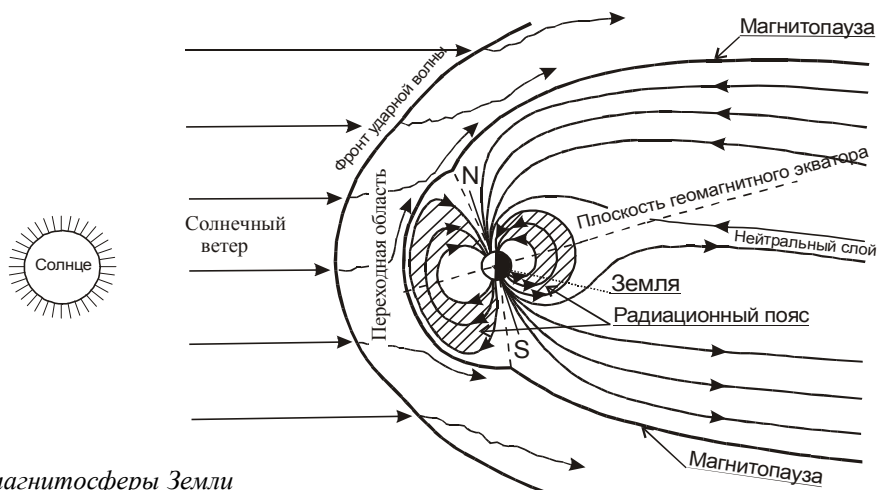


Рис. 6.79. Строение магнитосферы Земли

Земля постоянно находится в потоке корпускулярного излучения Солнца, так называемого «солнечного ветра», который образуется благодаря непрерывному расширению (истечению) плазмы солнечной короны и состоит из заряженных частиц (протонов, ядер и ионов гелия, а также более тяжелых положительных ионов и электронов). Солнечная плазма несет с собой магнитное поле, напряженность которого в среднем равна $4,8 \cdot 10^{-3}$ А/м ($6 \cdot 10^{-5}$ э).

При столкновении потока солнечной плазмы с препятствием – магнитным полем Земли – образуется распространяющаяся навстречу потоку ударная волна (рис. 6.79), фронт которой со стороны Солнца в среднем локализован на расстоянии 13–14 радиусов Земли (83–89 тыс. км) от ее центра.

За фронтом ударной волны следует переходная область толщиной ~20 тыс. км, где магнитное поле солнечной плазмы становится неупорядоченным, а движение ее частиц – хаотичным. Переходная область примыкает непосредственно к магнитосфере Земли, граница которой – *магнитопауза* – проходит там, где динамическое давление «солнечного ветра» уравновешивается давлением магнитного поля Земли. Она расположена со стороны Солнца на расстоянии 12 земных радиусов (70–80 тыс. км.) от центра Земли, ее толщина ~100 км. Напряженность магнитного поля Земли у магнитопаузы составляет $\sim 8 \cdot 10^{-2}$ А/м (10^{-3} э), то есть значительно выше напряженности поля солнечной плазмы на уровне орбиты Земли.

Потоки частиц солнечной плазмы обтекают магнитосферу и резко искажают на значительных расстояниях от Земли структуру ее магнитного поля. Примерно до расстояния трех земных радиусов (~20 тыс. км.) от центра Земли магнитное поле еще достаточно близко к полю магнитного диполя (напряженность поля убывает с высотой $\sim 1/R^3$). Регулярность поля здесь нарушают лишь магнитные аномалии (влияние аномалий сказывается до высот $\sim 0,5R$ над поверхностью Земли).

На расстояниях, превышающих ~20 тыс. км, магнитное поле ослабевает медленнее, чем поле диполя, а его силовые линии с солнечной стороны несколько прижаты к Земле.

Линии геомагнитного поля, выходящие из полярных областей Земли, отклоняются «солнечным ветром» на ночную сторону Земли. Там они образуют «хвост», или «шлейф», магнитосферы протяженностью более 5 млн. км [12, 25].

Возмущения магнитного поля Земли

Магнитное поле Земли подвержено вековым изменениям, которые, видимо, связаны с причинами, лежащими в недрах Земли. Однако существуют изменения магнитного поля, имеющие периодический характер. Эти изменения имеют внешние причины и связаны с деятельностью Солнца.

Все геомагнитные колебания условно подразделяют на два класса: регулярные и нерегулярные.

Регулярные колебания характеризуются устойчивостью и получили обозначение P_c . Этот класс колебаний в свою очередь делится на пять подклассов.

Нерегулярные колебания P_i содержат два подкласса.

Для дневных часов характерен устойчивый тип колебаний P_c , для ночных – нерегулярный тип P_i .

Устойчивые нерегулярные колебания, как полагают, связаны с солнечными, лунными и звездными сутками.

Так, плавное изменение магнитного поля в пределах от нескольких до десятков гамм ($1 \text{ гамма} = 10^{-5} \text{ Гс} = 1 \text{ нТл}$) объясняют «динамо-эффектом», возникающим при движении ионизированного вещества поперек силовых линий поля. Такого рода движения могут быть как приливного характера (вызваны силой тяготения Луны и Земли), так и обусловлены атмосферной циркуляцией, которая возникает при нагреве атмосферы Солнцем. Интересным типом регулярных короткопериодических колебаний являются колебания типа «жемчужин», которые объясняются взаимодействием заряженных частиц, испускаемых Солнцем, с электромагнитным полем в плазме. Период повторения колебаний типа «жемчужин» составляет 1–4 мин. Амплитуда колебаний ~ 10 –100 гамм. «Жемчужины» с периодом колебания $1 > 2$ –3 с появляются чаще всего на небольших территориях, в то время как $1 < 2$ с – глобально.

К нерегулярным колебаниям относятся всплески колебаний в ночное время, получившие название «цугов» (режим P_i). Период таких колебаний может меняться в интервале от 1 до 150 с.

В околоземном космическом пространстве и на поверхности Земли колебания геомагнитного поля происходят в широком диапазоне частот (от 10^{-5} до 10^2 Гц) и амплитуд (от 10^{-3} до 10^{10} Э).

В спокойное время в низких и средних широтах наблюдаются периодические солнечно-суточные и лунно-суточные магнитные вариации с амплитудами 30–70 гамм и 1–5 гамм соответственно.

Магнитные возмущения, охватывающие всю Землю и продолжающиеся от одного до нескольких дней, называются мировыми магнитными бурями, во время которых амплитуда отдельных составляющих может превзойти 1000 гамм. Магнитные бури, как правило, протекают в три фазы. В первую фазу, которая продолжается несколько часов, происходит возрастание горизонтальной составляющей компоненты поля H до нескольких десятков и даже сотен гамм. Спустя примерно час начинается убывание величины горизонтальной составляющей до напряженности на 100 гамм ниже нормальной. Это вторая фаза, которая продолжается примерно 12 ч. Следующая, заключительная фаза, во время которой напряженность достигает нормы, продолжается несколько дней. Это, прежде всего, относится к магнитным бурям, наблюдающимся вблизи полярных сияний.

По интенсивности магнитные бури условно разделяют на очень большие (более 200–500 гамм), большие (100–200 гамм) и малые (50 гамм). Слабые магнитные бури имеют 27-дневную периодичность. Это дает основание полагать, что на Солнце существуют магнитоактивные области (М области); период появления их равен времени оборота Солнца вокруг своей оси (27 земных суток).

Магнитная буря – одно из проявлений сильных возмущений магнитосферы, возникающих при изменении параметров «солнечного ветра», особенно скорости его частиц и нормальной составляющей межпланетного магнитного поля относительно плоскости эклиптики.

Характер изменения напряженности магнитного поля Земли в период возникновения магнитных бурь приведен на рис. 6.80.

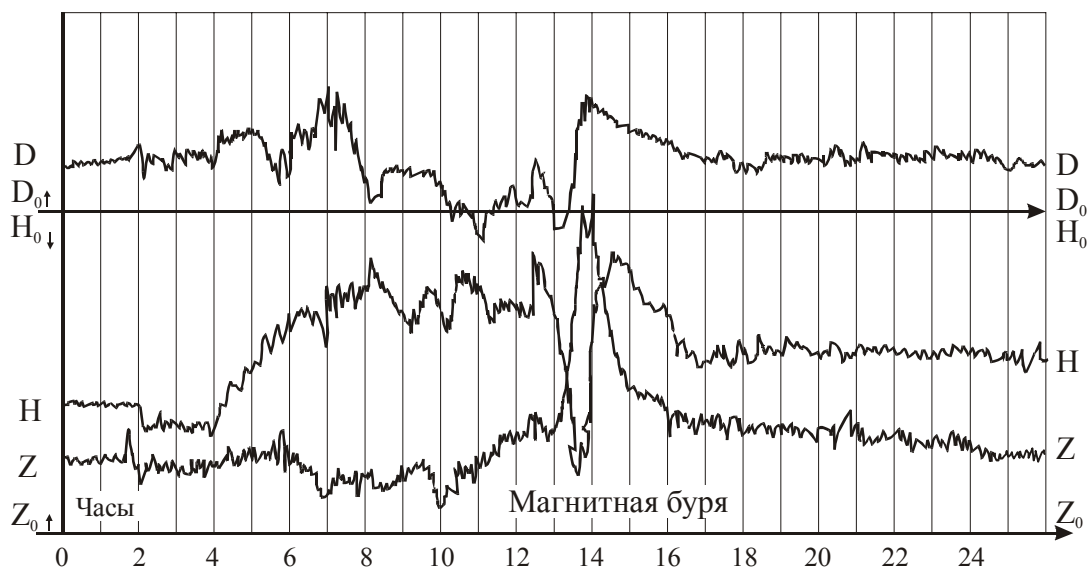


Рис. 6.80. Характер изменения напряженности магнитного поля Земли в период возникновения магнитных бурь

6.7.1. Влияние геомагнитных полей на окружающую среду

Учеными многих стран доказано, что геомагнитные поля влияют на окружающую среду и здоровье людей.

Во-первых, при магнитных бурях наблюдается непосредственное вторжение в магнитосферу частиц «солнечного ветра», происходит нагрев и усиление ионизации верхних слоев атмосферы, ускорение заряженных частиц, увеличение яркости полярных сияний, возникновение электромагнитных шумов, нарушение радиосвязи на коротких волнах и т.д.

Геомагнитные вариации служат одним из источников сведений о верхних слоях атмосферы. Магнитные возмущения, связанные, например, с магнитной бурей, наступают на несколько часов раньше, чем под ее воздействием происходят изменения в ионосфере, нарушающие радиосвязь. Это позволяет делать магнитные прогнозы, необходимые для обеспечения бесперебойной радиосвязи (прогнозы «радиопогоды»).

Сильные возмущения магнитосферы сопровождаются появлением в верхней атмосфере Земли полярных сияний, ионосферных возмущений, рентгеновского и низкочастотных излучений. Поэтому геомагнитные данные служат и для прогноза радиационной обстановки в околоземном пространстве при космических полетах [12, 25].

Во вторых, геомагнитное поле (ГМП) воздействует на живые организмы, растительный мир и на человека. Достоверно установлено, что фактор риска для людей, подверженных сердечно-сосудистым заболеваниям, испытывает вариации, связанные с изменением солнечной активности. Согласно известной статистике, фактор риска минимален в годы минимума солнечной активности и достигает максимума в периоды подъема и спада солнечной активности. Наиболее сильные магнитные бури и магнитосферные возмущения приходятся на период роста и спада солнечной активности.

Проведенные отечественными учеными исследования показали, что во время магнитных бурь у людей, страдающих, например, гипертонией, высока вероятность развития криза. В эти же периоды возрастает риск развития инфарктов миокарда (ИМ), а течение болезни гораздо тяжелее, чем у пациентов, у которых ИМ развился в относительно спокойной геофизической обстановке. В значительной мере магнитные бури способствуют развитию нарушений мозгового кровообращения, утяжеляют последствия заболевания. Смертность при сердечно-сосудистой патологии в первые 24 часа после развития магнитной бури достигает максимума, что объясняется своеобразной стрессовой реакцией больного организма на изменение магнитной обстановки, связанной с изменением солнечной активности [18].

Геомагнитное поле является важным фактором, влияющим на такие фундаментальные свойства эволюционного развития всех без исключения живых организмов, как наследственность и изменчивость, ответственные за уровень и ход мутагенеза в природе. Следовательно, ГМП – определяющий фактор в проявлении самых основных свойств живых организмов, и существенную роль в этом играют молекулы воды. Вместе с тем следует отметить, что сам глубинный механизм столь широкой и универсальной связи живых организмов с ГМП пока точно неизвестен.

Роль биомагнитных полей. Говоря о связи ГМП с гомеостазом биологических объектов, следует учитывать собственное магнитное поле живого организма, хотя о нем известно очень немного. По-видимому, оно складывается из сложного взаимодействия собственных магнитных полей на всех уровнях организации живой материи, начиная с субатомного.

Величина перманентного магнитного поля сердца составляет от $14 \cdot 10^{-7}$ до $14 \cdot 10^{-8}$ Гс, а головы около 10^{-9} Гс. Считается, что указанные магнитные поля являются производными от ионных электрических токов в головном мозгу и соответственно в мышечных группах сердца. Сигнал магнитного поля сердца и головы человека идентифицирован как истинный В-вектор, производимый ионными токами внутри соответствующих частей тела. Для головы человека таким определяющим током является альфа-ритм, которому свойственны электрические колебания в интервале от 8 до 12 Гц.

Установлено и влияние на живые организмы магнитных полей широкого диапазона частот от 7–12 Гц до 0,029–0,031 Гц. Первый интервал соответствует частоте электрической активности альфа-ритма, а второй – сверхмедленным колебаниям потенциалов головного мозга.

Связь живых организмов с локальными и глобальными естественными электрическими и магнитными полями подлежит изучению уже новой дисциплиной – *электромагнитной экологией*.

Искусственные магнитные и электрические поля и их влияние на природу и человека

Магнитные и электромагнитные поля, то есть электромагнитное излучение, присутствуют везде. Однако напряженность их компонентов разнообразна и зависит от источника излучения. Постоянные магнитные поля создаются при помощи постоянных магнитов и электромагнитов, питаемых от источников постоянного тока.

Переменные магнитные поля создаются специальными генераторами и другими электротехническими и радиоэлектронными устройствами. Например, поля низкой частоты 50–60 Гц генерируются сетями и потребителями переменного тока. В некоторых странах источниками электромагнитного излучения низкой частоты являются силовые сети железных дорог с частотой 16 и 2/3 Гц.

Помимо переменных полей, создаваемых сетями питания, электрические устройства генерируют другие частоты в зависимости от их функций. Источниками электромагнитных излучений являются: связь и радиовещание (телевидение, мобильные радиосистемы, телекоммуникации, радиосети, системы связи пожарных служб и полиции, военные системы связи, радиолюбительские передатчики, спутниковые системы связи, радары ПВО и т.п.).

Источниками сильного магнитного поля являются промышленное и научное оборудование, используемое, например, при вторичной плавке алюминия, электрохимической и электроэрозионной обработке металлов; микроволновые и плавильные печи, электрические системы, индукционный нагрев; выработка электроэнергии и ее распределение, ускорители частиц, сварочные агрегаты, электродуговая сварка и сварка пластмасс и др.

Источниками сильного магнитного поля в медицине является оборудование, используемое при плазменном нагреве, томографии, гипотермии и диатермии, в электрохирургии и т.п.

Влияние магнитного поля на живые организмы

Магнитные поля оказывают всестороннее влияние на живые организмы. Механизм этого влияния весьма разнообразен и зависит от многих факторов, что может использоваться в различных практических целях.

Магнитные поля являются разновидностью физической материи, осуществляющей связь и взаимодействие между электрически заряженными частицами. Известно, что ткани организма диамагнитны, то есть под влиянием магнитного поля не намагничиваются, однако многим составным элементам тканей (например, воде, форменным элементам крови) могут в магнитном поле сообщаться магнитные свойства.

Физическая сущность действия магнитного поля на организм человека заключается в том, что оно оказывает влияние на движущиеся в теле электрически заряженные частицы, воздействуя, таким образом, на физико-химические и биохимические процессы. Основой биологического действия МП считают наведение ЭДС в токе крови и лимфы. По закону магнитной индукции в этих средах, как в хороших движущихся проводниках, возникают слабые токи, изменяющие течение обменных процессов.

Кроме того, предполагают, что магнитные поля влияют на жидкокристаллические структуры воды, белков, полипептидов и других соединений. Квант энергии магнитных полей воздействует на электрические и магнитные взаимосвязи клеточных и внутриклеточных структур, изменяя метаболические процессы в клетке и проницаемость клеточных мембран [25].

Тепловое воздействие, вызванное поглощением ВЧ излучения

Глубина проникновения ВЧ излучения в организм человека зависит от таких факторов, как размер тела и состав воды в организме человека. Особенно критична частота от 50 до 500 МГц. При повышении частоты снижается глубина проникновения. Этот эффект хорошо известен и широко применяется в медицине.

При наличии неконтролируемого излучения опасность заключается в том, что механизмы регулирования температуры не реагируют на связанные с этим эффекты подогрева. Наши температурные датчики расположены в коже, где состав воды ниже. Эти датчики не способны засечь подогрев в теле, и поэтому потовые железы (железы) не включаются в работу. Следовательно, температура тела поднимается локально или глобально. Эта опасность признана всеобщей и потому предписаны ограничения.

Нетепловые эффекты ВЧ излучения

При модулированном ВЧ излучении возникают нетепловые эффекты на клеточном уровне. Это приводит к ослаблению иммунной системы, нарушению баланса гормонов и даже оказывает психологическое воздействие.

Выявлено, например, биологическое действие переменных электромагнитных полей в диапазоне от 0,2 до 100 кГц через изменение клеточной проницаемости биологических мембран.

Воздействие электромагнитного излучения на жизненно важные объекты

В последние годы стал известен термин «электромагнитный терроризм», возникший из-за того, что в мире, в том числе и в России, появились «специалисты», создающие и использующие устройства, генерирующие электромагнитное излучение в широком диапазоне частот и мощностей, то есть создающие «организованную» помеху.

Такое «организованное» электромагнитное излучение оказывает сильное «паразитное» воздействие на навигационную аппаратуру аэропортов; средства специальной связи милиции, скорой помощи, пожарных служб; вычислительные комплексы важного назначения и т.д.

В связи с этим возникает необходимость создания и внедрения специальной высокочувствительной аппаратуры для обнаружения источников магнитного и электромагнитного излучения с целью локализации деятельности «электромагнитных террористов».

В отличие от смога, который мы видим и ощущаем, человек не может непосредственно чувствовать электромагнитные поля. Поэтому необходимо вооружить население соответствующей аппаратурой и приборами, желательно портативными и индивидуального пользования.

Сведения о бытовых и промышленных источниках магнитного поля, воздействующих на человека, приведены в главе 27 тома 2.

6.7.2. МЭУ для диагностики магнитных бурь

Современные знания о магнитных бурях и их последствиях привели к необходимости разработки специальных средств, позволяющих своевременно обнаруживать наступление магнитной бури (МБ). При этом средства обнаружения МБ должны функционировать в реальном масштабе времени и в условиях большого промышленного города с сильными магнитными помехами, которые по амплитуде могут достигать 1000 нТл и более.

В этой связи должны решаться две основные технические задачи по разработке и организации промышленного производства [18]:

- малогабаритных магнитоэлектронных приборов (в том числе и индивидуального пользования), предназначенных для оценки магнитных возмущений с целью опережающего проведения профилактических мероприятий;
- автоматизированных комплексов специальной магнитоэлектронной аппаратуры для медицинских учреждений, предназначенных для регистрации магнитных бурь в условиях промышленных помех города и для защиты помещений с больными людьми от вредного влияния магнитных возмущений.

Обобщенная функциональная схема прибора для регистрации изменений магнитного поля Земли приведена на рис. 6.81.

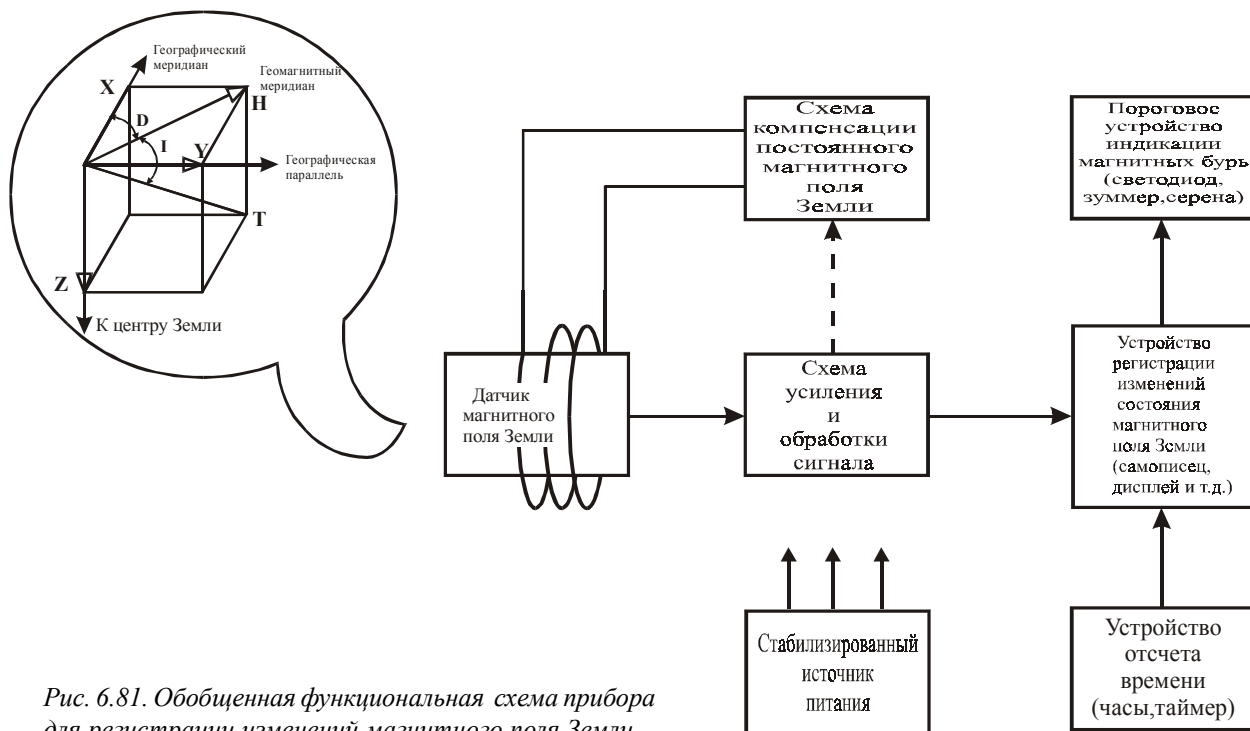


Рис. 6.81. Обобщенная функциональная схема прибора для регистрации изменений магнитного поля Земли

Основным элементом структурной схемы является высокочувствительный датчик магнитного поля Земли. Такой датчик может быть выполнен на основе микроминиатюрного феррозонда, тонкопленочного магниторезистора, магнитотранзистора или высокочувствительного элемента Холла. Как правило, датчик МПЗ содержит специальную катушку, предназначенную для компенсации постоянного магнитного поля Земли, и другие элементы предварительного усиления, модуляции и обработки сигнала.

Датчик МПЗ может регистрировать одну компоненту магнитного поля (обычно D -составляющую), две или все три (D , H , Z) компоненты магнитного поля Земли. Остальные элементы структурной схемы (рис. 6.81) не требуют особых пояснений.

В качестве датчиков магнитного поля Земли наибольшее распространение получили феррозондовые магнитные датчики и магнитометры на их основе.

Принцип работы феррозондового магнитометра

Высококчувствительные феррозондовые измерители и индикаторы отличаются большим разнообразием структурных и электрических схем, зависящих от метода обработки сигнала. В качестве примера на рис. 6.82 приведем упрощенную функциональную схему время-импульсного магнитометра.

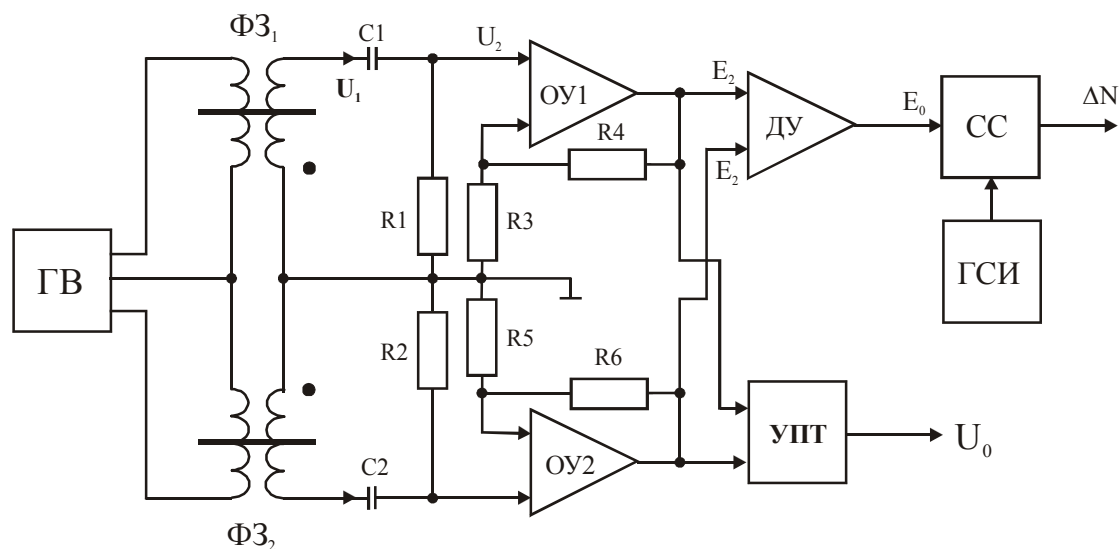


Рис. 6.82. Упрощенная функциональная схема время-импульсного магнитометра

Функциональная схема магнитометра содержит два идентичных феррозонда ΦZ_1 и ΦZ_2 , возбуждаемых от генератора ГВ, вырабатывающего импульсный ток треугольной формы. Измерительные обмотки ΦZ_1 и ΦZ_2 через соответствующие дифференцирующие цепи C1, R1 и C2, R2 связаны с входами операционных усилителей ОУ1 и ОУ2, которые выполняют роль компараторов, формирующих прямоугольные импульсы, модулированные по длительности.

На временных диаграммах работы магнитометра (рис. 6.83), приведенных для треугольной формы волны поля возбуждения H , видно, что после дифференцирования выходных импульсов U_1 феррозонда ΦZ_1 , продифференцированное напряжение U_2 в моменты переходов через нулевые значения приводит к срабатыванию компаратора ОУ1, формирующего прямоугольные импульсы E_1 . Аналогичным образом компаратор ОУ2, запускаемый сигналом от ΦZ_2 , формирует импульсы E_2 .

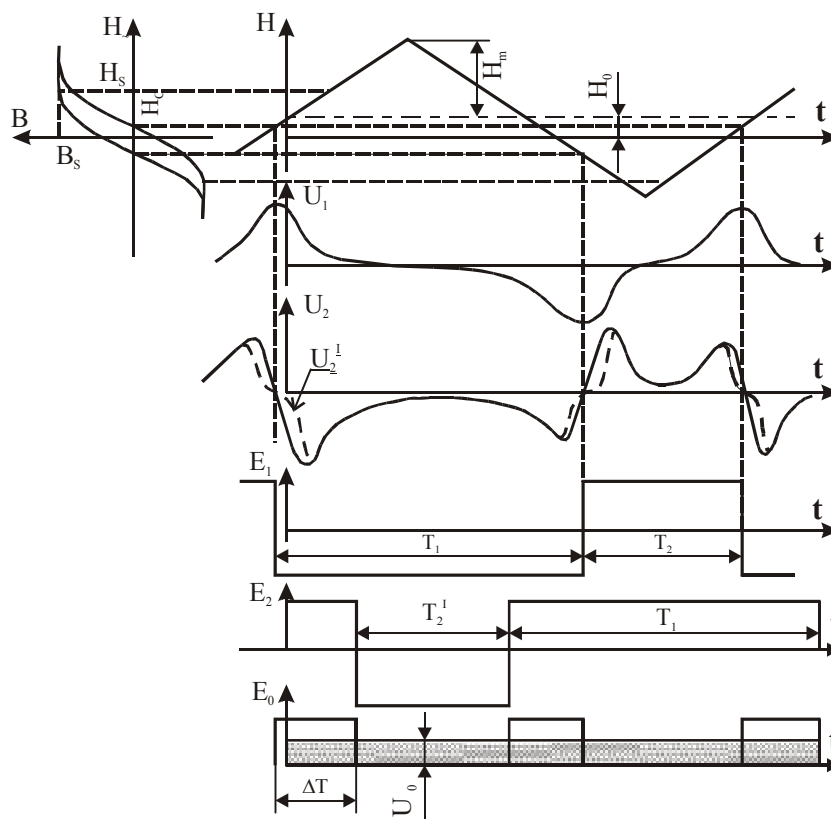


Рис. 6.83. Диаграмма сигналов время-импульсного магнитометра

При противофазном включении измерительных обмоток Φ_3 и Φ_2 импульсы E_1 имеют длительность отрицательных полувольт больше, чем положительных, а импульсы E_2 наоборот – длительность положительных больше, чем отрицательных. Поэтому на выходе дифференциального усилителя ДУ появляется разностный импульсный сигнал E_0 (рис. 6.83), длительность которого $\Delta t = T_1 - T_2$ пропорциональна измеряемому полю H_0 . Импульсы E_0 поступают на схему стробирования СС, пропускающую от генератора ГСИ высокочастотные импульсы ΔN в течение интервалов времени Δt . При подсчете числа импульсов ΔN цифровым счетчиком получается цифровой эквивалент напряженности измеряемого магнитного поля H_0 .

Для получения аналогового выхода в схеме магнитометра используется усилитель постоянного тока УПТ с фильтром нижних частот, выделяющий постоянную составляющую U_0 выходных импульсов, пропорциональную напряженности измеряемого поля.

Благодаря использованию феррозондов с сердечниками переменного сечения [22] удается снизить погрешности формирования импульсного сигнала. На рис. 6.83 показана для сравнения форма импульсов U_2 и U_1 на входе ОУ1, соответствующих сердечнику переменного и постоянного сечений соответственно. Феррозонд с переменным сечением сердечника имеет крутизну нарастания фронта импульсов U_2 при переходе через ноль выше, чем феррозонд с постоянным сечением сердечника. Для импульсов U_2 характерно наличие нелинейного ступенчатого изменения фронта при переходе через ноль, что может приводить к неопределенности моментов срабатывания компараторов ОУ1 и ОУ2.

Рассмотренная структурная схема магнитометра при треугольной форме волны возбуждения обладает относительно высокой стабильностью нулевого уровня и обеспечивает при использовании феррозондов диапазон измерения такого магнитометра до 100 А/м (~125 мкТл) при нелинейности характеристики преобразования менее 0,1%. Так как магнитометр не содержит частотно-избирательных элементов, то его предельное быстродействие характеризуется числом измерений в секунду, равным удвоенной частоте возбуждения феррозонда, в данном случае 4000 Гц.

В магнитометре может использоваться режим синусоидального поля возбуждения, но при этом нелинейность характеристики преобразования превысит 2,5% [22].

Координатная чувствительность феррозондовых магнитометров формируется при помощи специальных концентраторов магнитного поля и специфических конструкций самих феррозондов. Направление на источник магнитного поля определяется по отношению сигналов двух преобразователей, измеряющих компоненты X и Y магнитного поля.

6.7.3. Полупромышленные образцы магнитометров, реализованные с использованием феррозондов

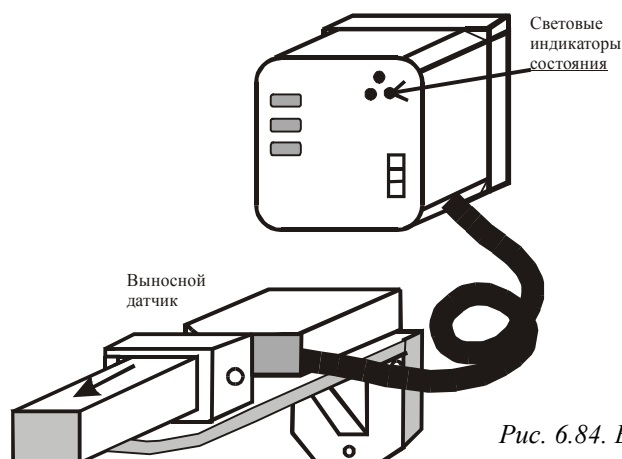
В качестве примера рассмотрим основные технические характеристики трех *магнитометров (ИБМ МФ-01, МФ-03 «MAGIC» и МФ-04 «MAGIC»)*, разработанных сотрудником ИЗМИРАНа В. В. Любимовым и предназначенных для диагностики магнитных бурь [18].

Основные параметры указанных приборов приведены в табл. 6.6, а на рис. 6.84–6.86 показан их внешний вид. Все приборы снабжены выносными датчиками магнитного поля Земли (ДМПЗ), построенными на базе однокомпонентного феррозондового преобразователя, и позволяют производить диагностику и оценивать интенсивность магнитной бури по величине магнитного склонения D – самой простой в реализации и самой информативной из составляющих магнитного поля Земли.

Таблица 6.6. Основные параметры приборов ИБМ МФ-01, МФ-03 «MAGIC» и МФ-04 «MAGIC»

№ п/п	Наименование параметра, единица измерения	Тип прибора/значение параметра		
		ИБМ МФ-01	ИБМ МФ-03	ИБМ МФ-04
1	Исполнение	носимый, стационарный	носимый, стационарный	стационарный
2	Тип преобразователя МП	феррозонд	феррозонд	феррозонд
3	Число одновременно измеряемых составляющих магнитного поля Земли	1	1	1
4	Максимальная амплитуда измеряемого магнитного поля, нТл	0 ± 1200	0 ± 2000	0 ± 2000
5	Число диапазонов измерения	4	2 (1)	4
6	Способ индикации результата измерений	аналоговый индикатор	цифровое табло	аналоговый индикатор аналоговое табло
7	Число градаций магнитных бурь, фиксируемых индикатором	3 (6)	-	6
8	Напряжение постоянного тока на аналоговом выходе, В	$0 \pm 2,8$	$0 \pm 3,0$	$0 \pm 3,0$
9	Число органов управления	2	2	2
10	Напряжение питания, В	6...12	6...12	9
11	Режим работы	кругло-суточный	кругло-суточный	кругло-суточный
12	Длина кабеля выносного датчика, м	10	0,8	6
13	Диапазон рабочих температур, °С	+20...+35	+20...+35	+20...+35
14	Габаритные размеры, мм	Н/Д	165 x 82 x 36 (без выносного датчика)	Н/Д
15	Масса комплекта, кг, не более	1,5	0,7	3

Эти приборы (табл. 6.60) позволяют проводить работы в любых местах и районах земного шара без проведения дополнительной настройки и регулировки их схемы. Они работают в реальном масштабе времени и за 1,5–2 ч предупреждают о начале магнитной бури.



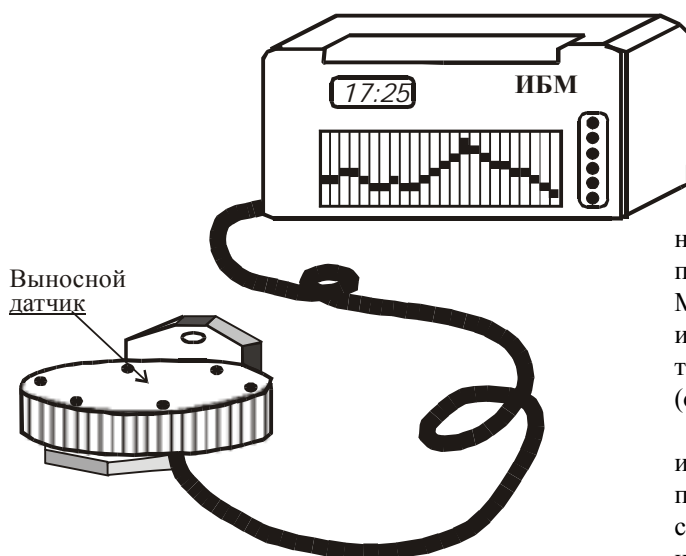
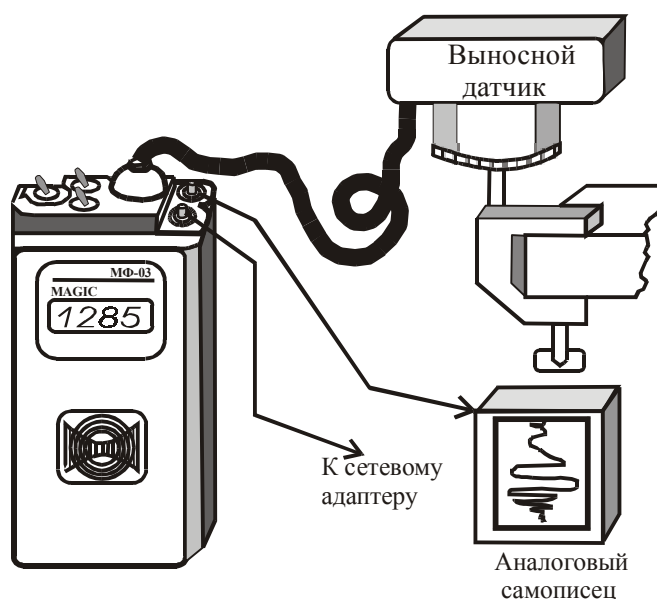
Индикатор магнитной бури МФ-01 предназначен для установки в медицинских учреждениях. Основным отличием этого прибора является то, что конструкция его достаточно проста, а его световой индикатор позволяет визуализировать только мгновенные значения интенсивности магнитной бури в данной измерительной точке и требует постоянного присутствия оператора или установки его индикаторной части в помещении, где круглосуточно находится дежурный медицинский персонал [18].

Рис. 6.84. Внешний вид индикатора магнитной бури ИБМ МФ-01

Однокомпонентный малогабаритный переносной феррозондовый магнитометр МФ-03 «MAGIC» представляет собой более сложную модель и предусматривает кроме цифровой индикации результатов измерений вывод информации на аналоговые самопишущие приборы.

Для регистрации результатов измерений вариаций магнитного поля, уровня электромагнитных шумов и импульсных помех использовались ленточные самопишущие потенциометры типа КСП-4, Н-39, НЗ99 и другие [18].

Рис. 6.85. Внешний вид диагностического магнитометра МФ-03 «MAGIC»



Индикатор магнитных бурь МФ-04 «MAGIC» не требует постоянного присутствия дежурного персонала, так как вся информация о вариациях МПЗ, осредненных на часовом измерительном интервале, фиксируется на индикаторном табло в течение суток, последовательно сдвигаясь (обновляясь) в текущем времени.

Одной из сложных проблем при использовании указанных приборов в условиях промышленного города или конкретного объекта, содержащего массу источников электромагнитных излучений, является поиск оптимального места для размещения выносных датчиков МПЗ. Такие места, как правило, определяются экспериментальным путем.

Рис. 6.86. Внешний вид индикатора магнитных бурь МФ-04 «MAGIC»

В табл. 6.7 представлены техногенные характеристики и дана оценка максимального уровня помех по магнитному полю – по D-составляющей вектора магнитного поля Земли – некоторых точек наблюдения. Наблюдения проводились при помощи приборов серии МФ [18].

Таблица 6.7. Техногенные характеристики магнитного поля по D-составляющей вектора магнитного поля Земли в некоторых точках наблюдения

Местоположение индикатора магнитной бури (ИБМ)	Место установки прибора	Высота над уровнем Земли	Характеристики а окружающих источников помех	Максимальный уровень импульсных помех, нТл	Максимальный градиент магнитного поля, нТл
г. Москва	Центральная клиническая больница №3	5-ый этаж, 8-ми этажного дома	ЖД - 0,5 км ТР - 0,5 км ПП - 0,1...0,3 км ЖД - 0,05...0,1 км Лифт - 0,01 км	80...100 (80...100) менее 30 20...30	500...1000
г. Троицк Московской обл.	ИЗМИРАН немагнитный павильон	1 этаж	шоссе - 0,1 км ПП - 0,03...0,1 км	15...30	20
г. Троицк Московской обл.	ИЗМИРАН главный корпус	3-ий этаж 3-х этажного дома	Шоссе - 0,1 км ПП - - 0,3 км	30...50	400...600
г. Троицк Московской обл.	Жилой дом	6-ой этаж 16-ти этажного дома	Шоссе - 0,1 км ЖД - 0,05 км ПБУ - на 1-ом эт.	100...200	600...800
г. Ялта Крымской обл.	Сейсмостанция "Ялта"	1...3 этаж 3-х этажного дома	ТР - 0,2 км ЖД - 0,03 км Стройка - 0,01 км ЛЭП - 0,01 км	10...20 5 65...70 10	100...500
г. Кисловодск Ставропольский край	ЦНИИКиФ клиника	3 - ий этаж 3-х этажного дома	Шоссе - 0,15 км ЖД - 0,05 км Стройка - 0,05 км Котельная-1 эт.	Менее 5 10...35 10...20	800...1000
г. Симферополь Крымская обл	Крымская ОМКП	Подвал 5-ти этажного дома	ТР - 0,01 км ЖД - 0,01 км	50...80	700...1000

Сокращения: ЖД – жилые дома; ЖЛД – железная дорога; Тр – троллейбусная линия; ПП – промышленное предприятие; ПБУ – предприятие службы быта; ЛЭП – линия электропередачи.

На рис. 6.87 показана типичная картина, получаемая при использовании магнитометра типа МФ-03. На данном рисунке приведены две характеристики МПЗ, полученные в одно и то же время на двух различных объектах контроля [18].



Рис. 6.87. Характер изменения напряженности магнитного поля Земли при использовании ИБМ типа МФ-03

К сожалению, серийный выпуск приборов ИБМ МФ-01, МФ-03 «MAGIC» и МФ-04 «MAGIC» в России не осуществлялся. Разработчиком было изготовлено более 30 опытных образцов [18].

При разработке и изготовлении ИБМ наиболее сложным и трудоемким является изготовление датчика МПЗ. В настоящее время зарубежными фирмами освоен промышленный выпуск миниатюрных феррозондовых датчиков с достаточно высоким уровнем магнитоэлектрических параметров, которые приводятся в главе 24 тома 2.

6.7.4. МЭУ в магнитотерапии

Магнитотерапия – метод физиотерапии, при которой на организм человека воздействуют постоянным или переменным низкочастотным магнитным полем.

Изучение влияния МП на различные органы и системы организма человека позволило установить некоторые различия в действии постоянного и переменного МП. Так, например, под воздействием постоянного магнитного поля понижается возбудимость центральной нервной системы, ускоряется прохождение нервных импульсов. Переменное магнитное поле усиливает тормозные процессы в центральной нервной системе.

Терапевтическое воздействие МП изучено недостаточно, но на основании имеющихся данных можно сделать вывод, что они оказывают противовоспалительное, противоотечное, седативное, болеутоляющее действие; улучшают микроциркуляцию, стимулируют регенеративные и репаративные процессы в тканях.

Показаниями для назначения магнитотерапии являются заболевания: сердечно-сосудистой системы (ишемическая болезнь сердца, гипертоническая болезнь I стадии); периферических сосудов (облитерирующий эндартерит, атеросклероз сосудов нижних конечностей, хроническая венозная недостаточность с наличием трофических язв, тромбозов и др.); органов пищеварения (язвенная болезнь желудка и двенадцатиперстной кишки); опорно-двигательного аппарата (ревматоидный артрит, остеоартроз и др.); ЦНС (последствия перенесенного нарушения мозгового кровообращения, черепно-мозговой травмы); кожные (аллергические и зудящие дерматозы, нейродермит, экзема и др.).

Магнитотерапия противопоказана при гипотонии, нейроциркуляторной дистонии с лабильным артериальным давлением, тенденциях к кровотечениям, гипокоагуляции крови. Кроме того, магнитотерапия противопоказана лицам, по роду профессии контактирующим с магнитными полями. (Подробнее см. [18, 23, 58].)

Источники постоянного магнитного поля в магнитотерапии

Источниками постоянного магнитного поля в магнитотерапии являются *магнитофоры* или *магнитоэласты*. Они представляют собой магнитоносители, изготовленные из полимерных, минеральных или порошкообразных ферромагнитных наполнителей, с небольшой магнитной активностью, равной обычно 10–50 мТл. Выполняются обычно в виде листов, пластин, пленок, колец, бус, браслетов, клипсов, поясов, стелек, магнитных повязок, рубашек, жилетов и т.д. Подробнее см. [58].

Источники переменного магнитного поля в магнитотерапии

Источниками переменного магнитного поля в магнитотерапии являются специальные аппараты для облучения электромагнитными волнами низкой частоты.

Магнитотерапевтические аппараты (МТА) состоят из электронного блока управления с пультом и блоком питания, которые связаны с резонансным индуктором, излучающим переменное электромагнитное поле низкой частоты.

Биологическое действие магнитного поля основано на наведении в электропроводящих потоках крови и лимфы как в движущемся проводнике электродвижущей силы, изменяющей течение обменных процессов в организме. При этом переменное магнитное поле усиливает тормозные процессы в центральной нервной системе.

Для нужд магнитотерапии используются различные виды переменных электромагнитных полей – знакопеременные, пульсирующие, вращающиеся, бегущие и др. В качестве источников переменного магнитного поля используются специальные генераторы, которые в зависимости от назначения могут быть портативными или стационарными.

В табл. 6.8 приводятся некоторые параметры портативных магнитотерапевтических аппаратов, а в табл. 6.9 – стационарных [12, 25].

Таблица 6.8. Основные параметры портативных аппаратов медицинского назначения, предназначенных для облучения электромагнитными волнами низкой частоты

№ п/п	Тип аппарата	Тип индуктора магнитного поля	Диапазон изменения магнитной индукции, мТл	Частота пульсации или вращения магнитного поля, Гц	Потребляемая мощность, Вт	Масса аппарата, кг	Воздействующий фактор
1	ИНФИТА	Плоские электроды	2-4 мВ/см	220, 30, 40, 52, 57, 60, 64, 70, 75, 80	10	3	бегущее импульсное низкочастотное электромагнитное поле
2	ИНФИТА-Т (приставка к аппарату ИНФИТА)	Плоские электроды	2-4 мВ/см	20-80	10	3	то-же
3	ИНФИТА-БИО (приставка к аппарату ИНФИТА)	Плоские электроды	1-2 мВ/см	20-80	10	3	то-же
4	ИНФИТА-БП (приставка к аппарату ИНФИТА)	4 к комплекта плоских электродов	1-2 мВ/см	20-80	10	3	то-же
5	ЭЛЕМАГС (ЛОР приставка к аппарату ИНФИТА)	Электроды-наушники	0.1-1 В/см 5 мТл	0-80	10	3	то-же
6	Урологический электромагнитный стимулятор ЭЛС	Электроды специальной формы	1 - 5 мТл.	2 - 3 кГц. (5 - 6 Гц)	0,1	0,3	низкочастотное модулированное электромагнитное поле
7	«Магнитер»	Плоские электроды	0-30	50 и 6	30	0,7	то-же
8	«Маг-30-3»	Плоские электроды	0-30	50	30	0,6	то-же
9	«Спектр»	7 комплектов плоских электродов	0,05...50	0,001...1000	Н/Д	1	то-же

Таблица 6.9. Основные параметры стационарных аппаратов медицинского назначения, предназначенных для облучения электромагнитными волнами низкой частоты

№ п/п	Тип аппарата (страна-изготовитель)	Тип индуктора магнитного поля	Диапазон изменения магнитной индукции, мТл	Частота пульсации или вращения магнитного поля, Гц	Потребляемая мощность, Вт	Габаритные размеры аппарата, мм	Масса аппарата, кг
1	Магнитотурботрон-2М	К	0...3,5	100	5000	2650 х 1250 х	800
2	«Магнитер» (РФ)	К	-	50...160	2500	2100х1190х1300	500
3	«Олимп-1» (РФ)	К	1,5/5	10/100	500	2450 х 450 х 410	30
4	«Полемиг» (РФ)	К	30	0,5...10	15	184 х 190 х 194	7
5	«Аврора-Мк-01» (РФ)	К	0...5	1...100	Н/Д	Н/Д	Н/Д
6	«Градиент» (РФ)	П	5...20/50	50/100	100	115 х 342 х 360	16
7	УМТ-91 (РФ)	П	4,2...32		1500	1840 х 1360 х 800	320
8	«Индуктор-2Г» (РФ)	П (2 шт)	0,5...3	5000	30	420 х 310 х 120	8
9	«Индуктор-2У» (РФ)	П (2 шт)	0,5...3	5000	30	420 х 310 х 120	8
10	«Индуктор-3ЛС» (РФ)	П (5 шт)	2...14	5000	30	420 х 310 х 120	8
11	«Полнос-1» (РФ)	П	35	50	130	Н/Д	50
12	«Полнос-101» (РФ)	К (2шт)	1,5	700/1000	50	386 х 255 х 230	12,5
13	«Полнос-2» (РФ)	П и К	75	10/17/25/ 150	200	Н/Д	55
14	«Полнос-3» (РФ)	П	10/20/30	12,5/17/25	70	386 х 255 х 230	10
15	«Magneto-4» (Италия)	К	0,1...5	1...100	300	1850 х 470 х 400	Н/Д
16	«MagLite» (Германия)	П (2шт)	30...50	3500	40	210х530х400	30

Сокращения: К – кольцевой индуктор; П – плоский индуктор

Как видно из табл. 6.9, в зависимости от желаемого характера электромагнитного поля индукторы выполняются кольцевыми (соленоиды) или плоскими.

Аппарат «Магнето-4» с кольцевым индуктором может перемещаться по продольным направляющим стола с пациентом. Аппарат той же фирмы «Магнето-1» комплектуется плоским индуктором. В МТА с кольцевыми индукторами воздействие поля на пациента осуществляется бесконтактно, а в аппаратах с плоскими индукторами (за редким исключением) – контактно. При этом в аппаратах с плоскими индукторами генерируются электромагнитные поля, магнитная индукция которых измеряется десятками миллитесла, а в аппаратах с кольцевыми индукторами магнитная индукция, как правило, на порядок меньше.

Контроль индукции магнитного поля у всех отечественных МТА осуществляется по выходному току или по показаниям лимбов ручек управления. Непосредственного измерения уровня электромагнитного излучения не производится.

На рис. 6.88.а приведена электрическая схема простого устройства, предназначенного для профилактического лечения магнитным полем.

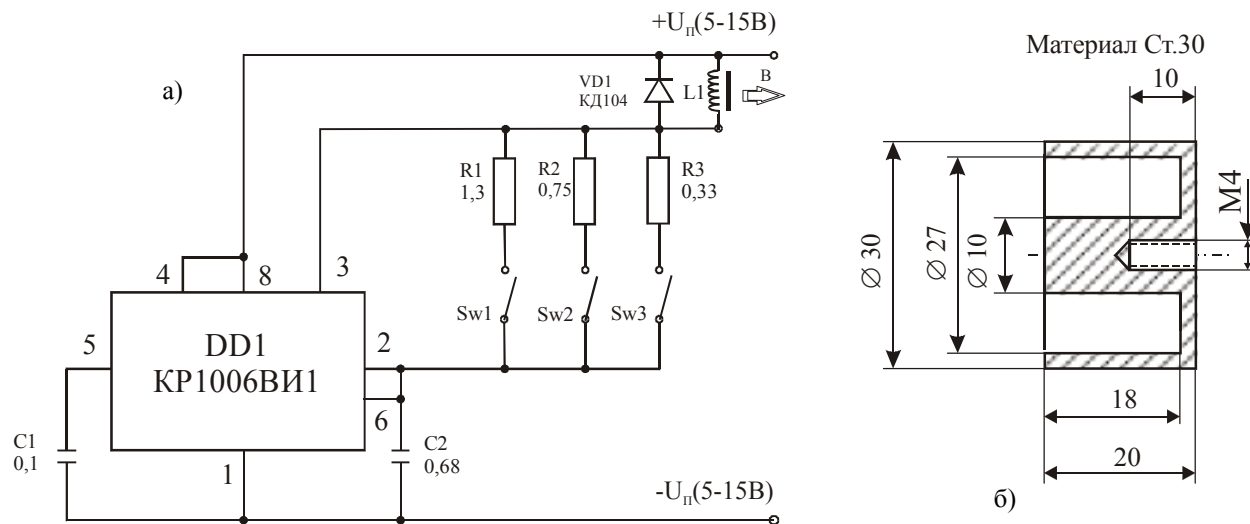


Рис. 6.88. Простое устройство для лечения магнитным полем: а – электрическая схема; б – конструкция источника магнитного поля

Предлагаемый вариант устройства выполнен на основе ИС таймера типа KP1006BI1, который работает в режиме генератора прямоугольных импульсов. Частота следования импульсов устанавливается в пределах 1–10 Гц путем коммутации переключателей Sw1–Sw4.

В качестве источника магнитного поля используется катушка L1, конструкция которой приведена на рис. 6.88б. Сердечник катушки изготовлен из мягкой стали. Обмотка катушки выполняется бескаркасной, проводом ПЭВ-2 (Ж 0,1–0,15 мм) с пропиткой каждого слоя эпоксидной смолой. Сопротивление катушки составляет от 30 до 50 Ом в зависимости от диаметра провода.

Все устройство монтируется на круглой печатной плате диаметром 50 мм и имеет вид больших наручных часов с ушками. В ушки продевается ремешок для закрепления устройства на руке или ноге.

Устройство питается от обычного сетевого адаптера (220/5, 9, 12 В) с максимальным током до 200 мА. Величина индукции магнитного поля устанавливается переключателем напряжения адаптера.

Это устройство может использоваться как обезболивающее при головных болях и мигренях, как стимулирующее средство при неврозах и переутомлении, для снятия ревматических болей и т.д. Частота магнитного поля подбирается индивидуально с помощью соответствующих переключателей. Обычно более низкие частоты используют при снятии ревматических болей, а более высокие – головных. Минимальное время ежедневного сеанса выбирается индивидуально и обычно составляет 15 мин.

6.7.5. Портативные приборы для измерения индукции магнитного поля

Во избежание побочных явлений, связанных с вредным воздействием магнитного поля, возникает необходимость постоянного и оперативного контроля магнитной обстановки. В быту контролировать магнитную обстановку можно при помощи простых портативных приборов.

На рис. 6.89 в качестве примера приведена принципиальная электрическая схема простого портативного миллитесламетра типа МТ-1 с температурной компенсацией основных параметров [20].

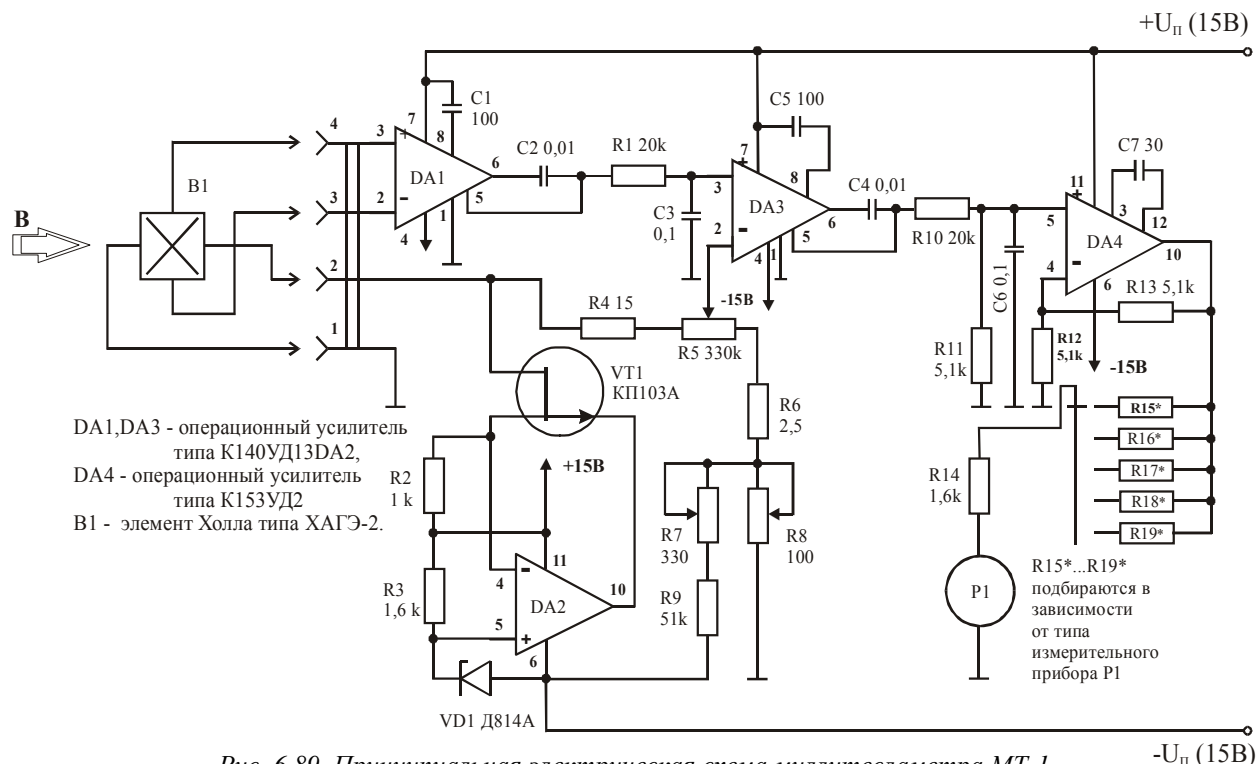


Рис. 6.89. Принципиальная электрическая схема миллитесламетра МТ-1

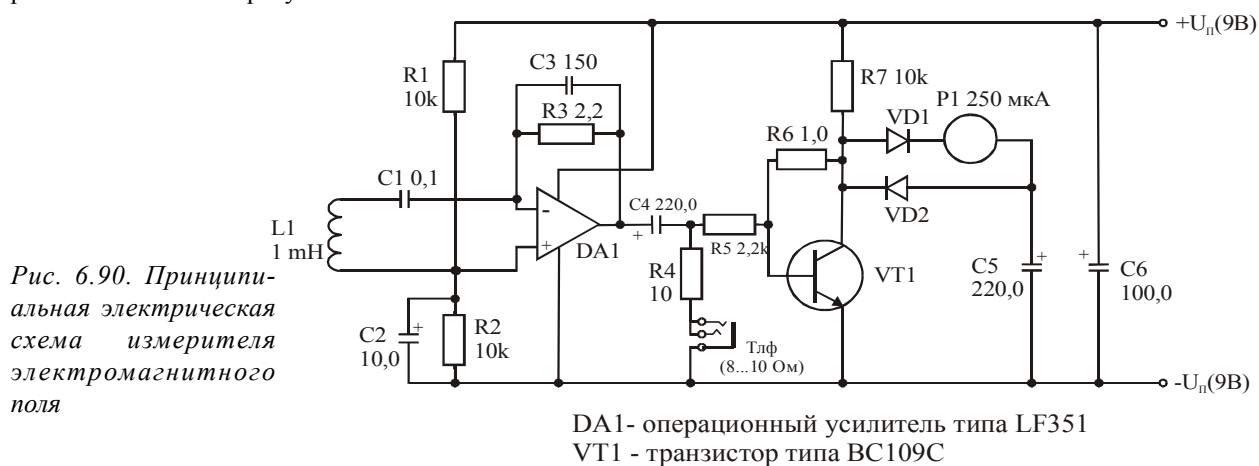
В приборе использован мезапланарный элемент Холла на основе эпитаксиальной пленки из арсенида галлия с $R_{ВХ} = 200$ Ом и током управления – 10 мА. Элемент Холла размещается в корпусе выносного зонда, соединенного с прибором специальным кабелем при помощи разъема. ЭХ питается от стабилизированного источника питания VT1, VD1 и DA2. Усилитель напряжения сигнала ЭХ реализован на операционных усилителях DA1, DA3, DA4. Первый и второй каскады усиления DA1, DA3 выполнены на ОУ типа К140УД13, имеющих высокое входное сопротивление, низкий уровень дрейфа нуля и большой коэффициент подавления синфазного сигнала.

Входной каскад усилителя D1 осуществляет предварительное усиление дифференциального сигнала ЭХ и исключает синфазное напряжение относительно общего провода схемы. В следующем каскаде DA3 происходит вычитание начального напряжения неэквипотенциальности элемента Холла $U_{ОСТ}$ при помощи подачи напряжения смещения на инвертирующий вход усилителя DA3 с делителя напряжения R9, R7, R8, а также компенсации температурного изменения напряжения неэквипотенциальности подачей компенсирующего напряжения на инвертирующий вход DA3 с делителя напряжения R4, R5, R6.

Резисторами R7, R8 производится установка 0 грубо и точно, а потенциометром R5 осуществляется установка уровня температурной компенсации напряжения неэквипотенциальности. Результаты измерений регистрируются стрелочным прибором P1 с пределом измерений 50–100 мкА. Прибор размещается в пластмассовом корпусе с габаритами 115 x 215 x 90 мм. Питание прибора осуществляется от сети 220 В при помощи встроенного источника питания.

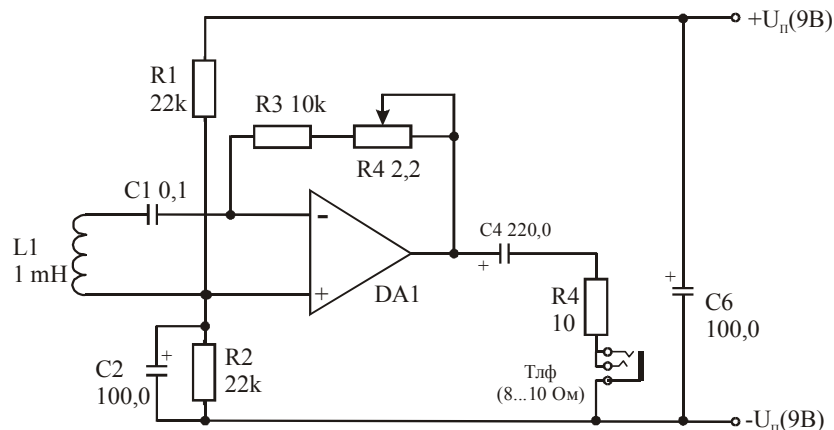
Миллитесламетр позволяет измерять индукцию постоянного и медленно меняющегося магнитного поля на поддиапазонах 0,06; 0,15; 0,6; 1,5 и 6 мТл при неконтролируемом изменении температуры зонда в диапазоне от 0 до +100 °C [20].

Электромагнитное поле можно измерить при помощи простейшего прибора, схема которого приведена на рис. 6.90. Схема не требует особых пояснений.



В качестве преобразователя магнитного поля используется катушка L индуктивностью 1 мГн. Для каркаса катушки используется корпус шариковой авторучки диаметром 8 мм. Прибор дает возможность оценивать уровень излучения ЭМП в диапазоне 45–65 Гц. Чувствительность прибора такова, что позволяет обнаруживать поле 20-ваттного трансформатора на расстоянии около 200 мм. Стрелочный индикатор прибора можно калибровать в единицах магнитной индукции (мТл, А/м) или в единицах напряженности поля (В/м). Калибровка производится по стандартным измерительным приборам.

Этот же прибор может использоваться и для поиска дефектов в скрытой электропроводке.



DA1 - операционный усилитель типа LF351 или UA741

Рис. 6.91. Принципиальная электрическая схема входного каскада измерителя электромагнитного поля с расширенным частотным диапазоном

При необходимости можно расширить диапазон рабочих частот измерителя ЭМП. Для этого входной каскад прибора необходимо выполнить в соответствии со схемой, приведенной на рис. 6.91. В этом случае частотный диапазон расширяется до 150 кГц. Выход «тлф» может использоваться для звукового контроля ЭМП с частотой до 15 кГц, для чего используются наушники с сопротивлением 8–10 Ом.

Основные параметры некоторых типов портативных измерителей индукции магнитного поля приведены в главе 25 тома 2.

Список литературы к главе 6

1. Абакумов А. А. (мл.), Амеличев В. В., Галушков А. И., Лебедев В. Л. Исследование интегрального матричного преобразователя магнитного поля на основе МОП магнитотранзисторов. Тезисы докладов IX научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (датчик-97)», г. Гурзуф. 1997.
2. Абакумов А. А. Матричный преобразователь магнитных полей к структуроскопу. Описание а. с. номер 859904 СССР. Оpubл. 1981. Бюл. номер 32.
3. Абакумов А. А., Абакумов А. А. (мл.), Галушков А. И. Перспективы применения матричных полупроводниковых преобразователей магнитного поля в системах слежения за развитием трещин трубопроводов и резервуаров. Тезисы докладов X научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (датчик-98)», г. Гурзуф.
4. Абакумов А. А., Абакумов А. А. (мл.), Чаплыгин Ю. А., Галушков А. И. Оценка погрешностей, калибровка и градуировка полупроводниковых матричных сканеров распределенных магнитных полей. Тезисы докладов VIII научно-технической конференции «Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления (датчик-96)», г. Гурзуф. 1996.
5. Акимов Н. Н., Ващуков Е. П. и др. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА. Справочник. – Минск: Беларусь, 1994. – 591 с.
6. Атертон Д. Л., Ивлин Д. К., Ноубл Д. Дифференциальный с усилением по переменному току преобразователь Холла для измерения остаточного магнитного поля. Материалы фирмы «F.W. Bell». 1984. – 17 с.
7. Афанасьев Ю. В. и др. Средства измерения параметров магнитного поля. – Л.: Энергия, 1979. – 320 с.
8. Бараночников М. Л. Применение магниторезисторов // Радио, 1994, № 11, – с. 34–36; № 12, – с. 36–38.
9. Гурьев И. С. Адаптивные магнитометрические системы контроля пространственного положения. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 96 с.
10. Егизарян Г. А., Стафеев В. И. Магнитодиоды, магниторезисторы и их применение. – М.: Радио и связь, 1987. – 88 с.
11. Зайцев Ю. В., Марченко А. Н., Ващенко В. И. Полупроводниковые резисторы в электротехнике. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136 с.
12. Земной магнетизм. БСЭ. Издание третье. 1972. Т. 9. – С. 502–504.
13. Использование устройства KMZ-10. Инструкция по эксплуатации фирмы «Valvo». 1988. – 26 с. Пер. ст. из журнала «Electronic Components and Applications», 1988, vol/8, #4, pp. 229–239.
14. Катус Г. П. Автоматическое сканирование. – М.: Машиностроение, 1969 – 520 с.
15. Компас. БСЭ. Издание третье. 1973. Т. 12. – С. 581.
16. Котельников В. С., Сухоруков В. В. Дефектоскопия канатов грузоподъемных машин // Безопасность труда в промышленности, № 5, 1998. – С. 34–38.
17. Ллойд Дж. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978. – 414 с.
18. Любимов В. В., Гурфинкель Ю. И., Ораевский В. В. Опыт применения диагностических магнитометров в условиях города и клиниках. ИЗМИ РАН. – М., 1993. – 28 с.
19. Микросхемы Холла серии K1116КП. «ГИПЕРОН». – М., 1991. – 58 с.
20. Мирзабаев М. М., Потаенко К. Д. и др. Эпитаксиальные датчики Холла и их применение. Ташкент. ФАН Уз. ССР, 1986. – 214 с.
21. Прецизионный микромощный инструментальный усилитель INA-118P. 1998. – 7 с. (Проспект фирмы «Burr-Brown»).
22. Семенов Н. М., Яковлев Н. И. Цифровые феррозондовые магнитометры. – Л.: Энергия, 1978. – 168 с.
23. Сига Х., Мидзутани С. Введение в автомобильную электронику. – М.: Мир, 1989. – 232 с.
24. Ситников Э. К., Хомерики О. К. Принципы построения магнитных систем бесконтактных клавиш, предназначенных для ручного ввода информации. – В кн. Теория и устройства систем автоматического управления. – Тбилиси: Мецниереба, 1979. – С. 24–37.
25. Строение Земли. Магнитосфера. БСЭ. Издание третье. 1972. Т. 9. – С. 478–479.
26. Сухоруков В. В. Неразрушающий контроль стальных канатов: новые приборы // Контроль. Диагностика, № 1, 1998.
27. Тимофеев Б. М. Опыт магнитной дефектоскопии стальных канатов шахтных подъемов на Зыряновском горно-обогатительном комбинате // Горная промышленность, № 1, 1999.
28. Хенке Г. Линейные и дискретные датчики Холла. Основы теории и приложения. D-6050 Offenbach. 1990. – 16 с. (Материал фирмы «Honeywell GmbH»).
29. Хомерики О. К. Полупроводниковые преобразователи магнитного поля. – М.: Энергоиздат, 1986. – 136 с.
30. «1 & 2 Axis Magmetoresistive Microcircuits HMC1021 / 1022. 1999. – 4 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).

31. 89 Murata Products. Sensors. (Каталог фирмы «Murata»). – С. 53–57.
32. Apteurs magnetoresistifs (KMZ10A, KMZ10B, KMZ10C.). 1989. – 4 p. (Каталог фирмы «RTC»).
33. Bharat B., Pant Ph. D., Physics Mike Caruso. Sensor Applications Engineer. Magnetic Sensor Cross-Axis Effect. 1999. – 6 p. (Рекомендация фирмы «Honeywell»).
34. Compass heading using magnetometers. 1999. – 2 p. (Материалы фирмы «Honeywell»).
35. Digital Compass Module HMR3000. 1999. – 2 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
36. Earth Magnetic Field Sensor EMF-01. 2000. – 2 p. (Проспект фирмы «Xensor Integration bv»).
37. Hall Effect Transducers. How to apply them as sensors. MICRO SWITCH a Honeywell Division, 1988. – 280 p.
38. Handbook. File under Discrete Semiconductors. SC17. Data Sheet General. Magnetic field sensors. Discrete Semiconductors. «Philips Semiconductors». 1998, Jun 12. – 58 p.
39. Handbook. File under Discrete Semiconductors. SC17. Data Sheet General. Rotational speed measurement. «Philips Semiconductors». File under Discrete Semiconductors, SC17. 1998, Jun 15. – 27 p.
40. Highly Sensitive Hall Generator (Cylindrical Hall) CYH-21. 2000. – 3 p. (Проспект фирмы «SETRON AG»).
41. High-Sensitivity Magnetoresistive Magnetometer MMS101. (Проспект фирмы «Space Electronics Inc.»), 1994.
42. High-Sensitivity Magnetoresistive Magnetometer MMS101. 1994. – 4 p. (Проспект фирмы «Space Electronics Inc.»),
43. Instrumentation Amplifier Application Guide. 2ND Edition. Analog Devices. 1992. – 50 p. (Материал фирмы «Analog Devices»).
44. Integrated 2-Axis Hall Element 2D-VD-11. 2000. – 2 p. (Проспект фирмы «SETRON AG»).
45. Integrated 3-Axis Hall Generator 3D-H-10. 2000. – 2 p. (Проспект фирмы «SETRON AG»).
46. Linear / Angular Displacement Sensor HMC1501. 1999. – 2 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
47. Magnetic gradiometer circuit. 1999. – 1 p. (Рекомендация фирмы «Honeywell»).
48. Magnetic sensor hybrid application circuit. 1999. – 1 p. Рекомендация фирмы «Honeywell».
49. Magnetic Sensor Products HMC / HMR Series. 1999. – 4 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
50. Michael J. Caruso. Applications of Magnetoresistive Sensors in Navigation Systems. 1999. – 8 p. (Материал фирмы «Honeywell»).
51. MICRO SWITCH. Sensing and Control. Solid State Sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1997.
52. Micropower, ultra-sensimive Hall-effect switch 3210. 1999. – 12 p. (Проспект фирмы «Allegro MicroSystems»).
53. Mike Caruso. Sensor Applications Engineer. Set / Reset pulse circuits for HMC1021/22. 1999. – 2 p. (Материал фирмы «Honeywell»).
54. Model CS-150 and CSS-150. Current Switches. 1999. – 2 p. (Проспект фирмы «F. W. Bell»).
55. One and two axis magnetic sensors HMC1001 HMC1002. 1999. – 8 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
56. One-axis magmetoresistive microcircuit. HMC1001. Honeywell. 1995. – 2 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
57. Pression Single Supply Instrumentation Amplifier. Analog Devices. 1997. – 16 p. (Материал фирмы «Analog Devices»).
58. Ron Lawrence, Paul J. Rosch, Judith Plowden. Magnet Therapy. The pain cure alternative. (Магнитотерапия. Альтернативный метод облегчения боли). Пер. с англ. – М: КРОН-ПРЕСС, 1998. – 234 с
59. RS Components. Catalogue, 1998. – 2000 с. (Каталог фирмы «RS Components»).
60. Schott Ch., Popovic R. S. Integrated 3-D Magnetic Field Sensor. EPFL-Swiss Fed. Inst. of Technology. 1999. – 4 p.
61. Set/Reset pulse circuits for magnetic sensors. 1999. – 3 p. (Материал фирмы «Honeywell»).
62. Siemens Component Service. Preferred Products 1977. – Pp.38–43. (Каталог фирмы «Siemens Aktiengesrllschaft»).
63. Siemens Component Service. Preferred Products 1997. – 28 p. (Каталог фирмы «Siemens Aktiengesrllschaft»).
64. Siemens Component Service. Preferred Products. April 1990. – 13 p. (Каталог фирмы «Siemens Aktiengesrllschaft»).
65. Smart digital magnetometer HMR2300. 1999. – 12 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
66. Smart digital magnetometer in the laboratory AN-200. 1999. – 2 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
67. Smart digital magnetometr. HMR Series. Honeywell. 1995. – 2 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
68. Solid State Sensors. Position, current, flow, liquel level and temperature sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1989. – Pp. 4–48.
69. Terrestrial magnetic field sensor units. Perpendicular flux gate method TMS series. 1999. – 1 p. (Материалы фирмы «TDK»).
70. The MICR0 SWITCH key advantage:Hall-effect Keyboards from the developers of Hall-effect technology. SD Series . 1999. –22 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
71. Three-Axis Magnetic Sensor Hybrid HMC2003. 1999. – 4 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).

- 72. Three-axis strapdown magnetometer HMR2300r. 1999. – 8 p. (Проспект фирмы «Honeywell»).
- 73. Tree-axis magnetic sensor hybrid. HMC2003. Honeywell. 1995. –2 p. (Проспект фирмы Honeywell»).
- 74. Two-axis magmetoresistive microcircut. HMC1002. Honeywell. 1995. – 2 p. (Проспект фирмы Honeywell»).
- 75. Wellhausen H. Elecktronischer Kompab // Elektronik, 8/14, 4, 1987. – Pp. 85–89.

Глава 7. Основные элементы конструкции изделий микромагнитоэлектроники

Конструкция современных изделий микромагнитоэлектроники является достаточно сложной и состоит из множества различных узлов, деталей и элементов.

В общем виде конструктивные элементы изделий микромагнитоэлектроники могут быть представлены одним, достаточно общим, термином - **арматура**.

На рис. 7.1 приведены основные элементы, обобщенно представляющие арматуру изделий микромагнитоэлектроники.

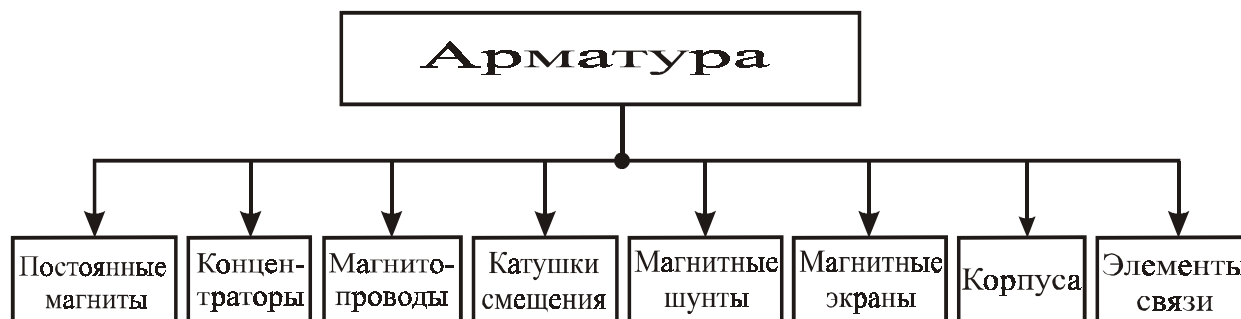


Рис. 7.1. Основные элементы, обобщенно представляющие арматуру изделий микромагнитоэлектроники.

7.1. Постоянные магниты

Постоянный магнит является основным элементом большинства изделий микромагнитоэлектроники. К постоянному магниту, используемому в изделиях микромагнитоэлектроники, предъявляются определенные требования, которые зависят от конкретных условий применения и конструкции изделия.

Из общих требований можно отметить следующие.

Постоянный магнит должен обладать широкой петлей гистерезиса, которая обеспечивает большую энергию его перемагничивания и, следовательно, не только максимальную удельную энергию (большая сила при меньшем объеме), но и большую устойчивость к воздействию мощных посторонних магнитных полей.

Основным действующим стандартом на термины и определения в области магнитных материалов является ГОСТ 19693-74 (Материалы магнитные. Термины и определения. СССР) и его продолжения, содержащие порядка 130 терминов.

В таблице 7.1 приводятся определения некоторых наиболее употребляемых терминов, относящихся к общим характеристикам и параметрам материалов используемых для изготовления постоянных магнитов.

Таблица 7.1. Основные термины и определения, используемые при оценке качества постоянных магнитов.

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение	Единица измерения	Определение
Остаточная индукция	B _r	Гс кГс Тл	Индукция, сохраняющаяся в магнитном материале после намагничивания его до насыщения и уменьшения напряженности магнитного поля в нем до нуля.
Коэрцитивная сила по намагниченности	H _c	э; кэ А/м кА/м	Величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения намагниченности от остаточной намагниченности до нуля
Коэрцитивная сила по индукции	H _b	э; кэ А/м кА/м	Величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для изменения магнитной индукции от остаточной индукции до нуля
Удельная энергия (плотность) магнитного поля	W	Дж/м ³	Величина, равная половине скалярного произведения вектора магнитной индукции на вектор напряженности магнитного поля в какой-либо точке поля. Термин удельная энергия, определяемый как энергоёмкость часто используется при оценке качества постоянных магнитов.
Энергетическое произведение	BH	Тл*А/м МГс*э	Величина, равная скалярному произведению вектора магнитной индукции на вектор напряженности магнитного поля в какой-либо точке поля.
Максимальная индукция	B _D	Гс кГс Тл	Индукция, соответствующая максимальной удельной энергии
Максимальная напряженность	H _D	э; кэ А/м кА/м	Напряженность, соответствующая максимальной удельной энергии

Продолжение таблицы 7.1.

Наименование параметра, термина.	Условное обозначение	Единица измерения	Определение
Релаксационная коэрцитивная сила	H_K	э; кЭ А/м кА/м	Величина, равная напряженности магнитного поля, необходимого для приведения магнитного материала с остаточной намагниченностью в статически размагниченное состояние
Температурный коэффициент остаточной индукции	α_B	%/°C	Коэффициент изменения магнитной индукции, вызванной изменением температуры
Точка Кюри	Θ T_K	°C	Температура постоянного магнита при которой области спонтанного намагничивания (домены) под действием теплового движения разрушаются и ферромагнетик становится парамагнетиком. Т.е. происходит размагничивание магнита.
Начальная кривая намагничивания по индукции	-	-	Кривая, выражающая зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля в процессе намагничивания, предварительно термически размагниченного (нагретого выше точки Кюри или точки Нееля) магнитного материала при монотонном возрастании напряженности магнитного поля.
Начальная кривая намагничивания по намагниченности	-	-	Кривая, выражающая зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля в процессе намагничивания, предварительно термически размагниченного (нагретого выше точки Кюри или точки Нееля) магнитного материала при монотонном возрастании напряженности магнитного поля.
Основная кривая намагничивания	-	-	Кривая, представляющая собой геометрическое место вершин симметричных петель магнитного гистерезиса, которые получаются при последовательно возрастающих максимальных значениях напряженности магнитного поля.
Петля гистерезиса по индукции	-	-	Замкнутая кривая, выражающая зависимость магнитной индукции материала от напряженности магнитного поля при периодическом достаточно медленном изменении последнего.
Петля гистерезиса по намагниченности	-	-	Замкнутая кривая, выражающая зависимость намагниченности материала от напряженности магнитного поля при периодическом достаточно медленном изменении последнего.
Симметричная петля гистерезиса	-	-	Петля магнитного гистерезиса, получаемая при циклическом изменении напряженности магнитного поля между равными по абсолютному значению максимальной и минимальной напряженностями и симметричная относительно начала координат
Несимметричная петля гистерезиса	-	-	Петля магнитного гистерезиса, получаемая при циклическом изменении напряженности магнитного поля между равными по абсолютному значению максимальной и минимальной напряженностями.
Предельная петля гистерезиса	-	-	Симметричная петля магнитного гистерезиса, максимальное значение намагниченности которой соответствует намагниченности технического насыщения.
Кривая размагничивания по индукции	-	-	Часть нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса по индукции между точкой, для которой равно нулю значение напряженности магнитного поля, и точкой, для которой равно нулю значение магнитной индукции.
Кривая размагничивания по намагниченности	-	-	Часть нисходящей ветви петли магнитного гистерезиса между точкой, для которой равно нулю значение напряженности магнитного поля, и точкой, для которой равно нулю значение магнитной индукции.

Выбор материала для постоянного магнита

При выборе материала для изготовления магнита необходимо одновременно учитывать многие факторы.

Важнейшими из них являются энергоемкость материала, наличие в его составе дефицитных компонентов, температурная и временная стабильность и др. Кроме того, на выбор материала существенное влияние оказывают условия эксплуатации магнита, его стоимость и предполагаемый объем производства изделий.

Качество постоянного магнита наиболее наглядно определяется его классической характеристикой. Вариант типовой характеристики постоянного магнита приведен на рис. 7.2.

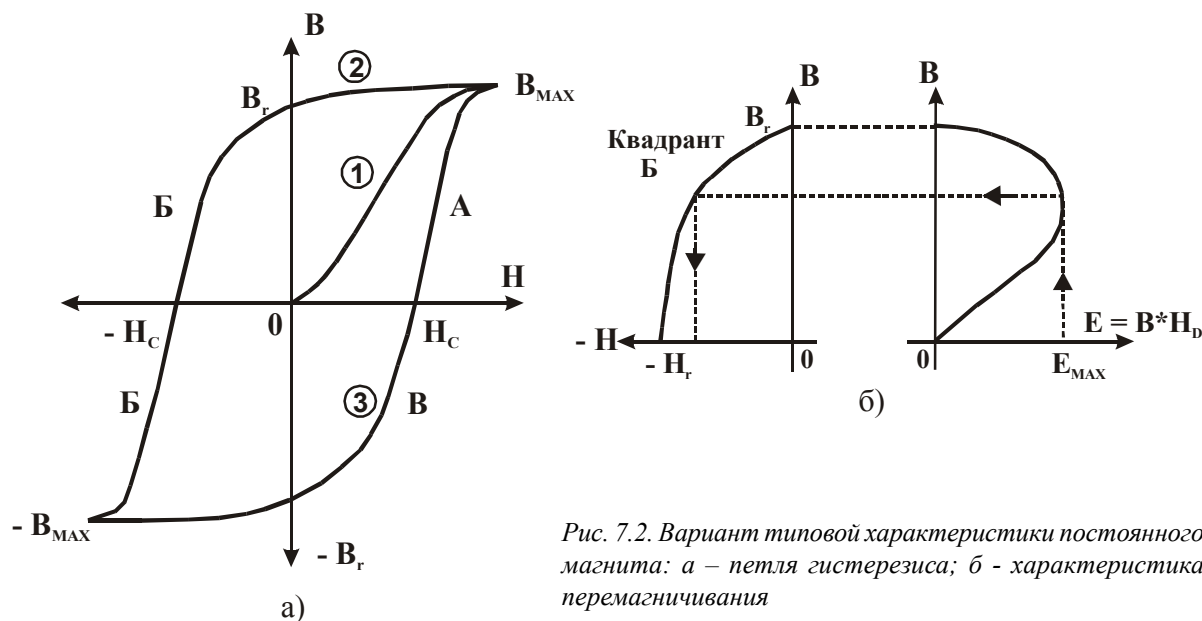


Рис. 7.2. Вариант типовой характеристики постоянного магнита: а – петля гистерезиса; б – характеристика перемагничивания

Из рис. 7.2.а видно, что график 1 – это первоначальная кривая, по которой магнит намагничивается только один раз от 0 до индукции насыщения B_{MAX} . В процессе размагничивания функция $B(H)$ пойдет по кривой 2 до индукции $-B_{MAX}$. Затем петля замкнется по кривой 3.

На рис. 7.2.б приведена характеристика перемагничивания постоянного магнита. Энергия E , затрачиваемая на размагничивание, пропорциональна произведению $B \cdot H$. На рис. 7.2.б показан квадрант размагничивания Б. Кривая для освобождаемой энергии имеет максимум $E_{MAX} = B \cdot H_D$.

Другими словами, магнит размагнитится, если создать напряженность большую, чем H_D . Предельная форма петли – прямоугольник.

Важнейшим параметром при изготовлении постоянных магнитов является энергоемкость материала, так как чем выше значение магнитной энергии, приходящейся на единицу объема вещества, тем меньше объем магнита и рассеяние его потока.

Кроме того, при выборе материала ПМ учитывается предельное значение напряженности ($H_{пр}$) размагничивающего стороннего поля, после воздействия которого магнит восстанавливает свой поток. Приближенную оценку качества магнитного материала можно производить по произведению $\Theta \cdot W_{уд}$, (где Θ – магнитная твердость материала, $W_{уд}$ – удельная энергия в кДж/м³). [2]

Стабильность постоянных магнитов

Магнитный поток, создаваемый постоянным магнитом, меняется с течением времени и при воздействии внешних условий: магнитных полей, механических нагрузок, температуры, радиации, влияния соседних ферромагнитных масс, изменения магнитного сопротивления и т.д.

Магнитная нестабильность может иметь обратимый и необратимый (гистерезисный) характер. Если после возвращения внешних условий к исходным магнитные свойства восстанавливаются, то имеют место обратимые изменения, при наличии гистерезиса – необратимые. Необратимые изменения, вызванные магнитной нестабильностью, можно устранить повторным намагничиванием материала.

Магнитное старение происходит по закону, близкому к логарифмическому.

Магнитное старение постоянных магнитов в зависимости от марки магнита и положения рабочей точки меняется от десятых долей процента до нескольких процентов за один год.

Временная стабильность постоянных магнитов составляет от 1000 до 100000 и более часов.

Изменение индукции постоянного магнита при изменении температуры характеризуется температурным коэффициентом магнитной индукции, равным

$$\alpha_B = \frac{\Delta B}{B \times \Delta T}, \% / ^\circ C \quad (7.1)$$

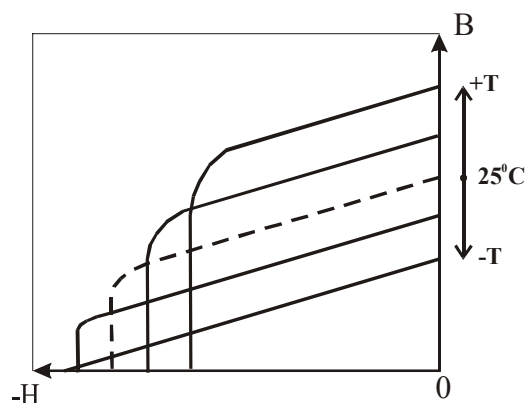
где B – магнитная индукция при начальной температуре;

ΔB – изменение индукции, вызванное изменением температуры;

ΔT – изменение температуры.

Температурный коэффициент (α_B) в зависимости от типа магнита составляет от сотых долей процента до половины процента на каждый градус изменения температуры. Характер изменения основных параметров магнита приведен на рис. 7.3.

Рис. 7.3. Характер изменения основных параметров постоянного магнита при изменении температуры.



В таблицах 7.2 и 7.3 приведены основные обобщенные характеристики материалов постоянных магнитов, используемых в изделиях микромагнитоэлектроники.

Наибольшее распространение в России получили постоянные магниты из следующих материалов: литые сплавы ЮН14ДК24 («Альнико») и ЮНДК35Т5АА, феррит бария 19БА260.

В последние годы все активнее используются сплавы кобальта с редкоземельными элементами типа «самарий-кобальт» (Кс37) и «неодим-железо-бор» (Нм36Р, Нм32Ди4р). Однако эти материалы имеют высокую твердость, крупнозернистую структуру, вследствие чего обладают повышенной хрупкостью, склонны к растрескиванию, выкрашиванию частиц и сколам по краям, что исключает их обработку резанием обычными методами (используется резка алмазными дисками, шлифование, анодно-механическая, электроэрозионная и электрохимическая размерная обработка).

Постоянные магниты выпускаются в форме брусков, цилиндров, пластин, колец, дисков и др. Основные обобщенные характеристики постоянных магнитов, используемых в МЭУ приведены в главе 26. [2, 4, 5, 6, 8, 10, 11]

Таблица 7.2. Основные обобщенные характеристики материалов постоянных магнитов, используемых в изделиях микромагнитоэлектроники [5]

№ п/п	Материал постоянного магнита	Остаточная магнитная индукция, (Br), Тл	Максимальное энергетическое произведение, (B*N), кДж/м ³	Плотность, кг/м ³	Удельная цена 1 Дж/м ³ за 1 долл.	Цена за 1 кг, долл.	Объем при Br=1 Тл, см ³
1	"Феррооксидюр 80" [SmFe ₁₂ O ₁₉]	0,39	28,май	5,2	0,5...1,0	5..10	25
2	"Альнико" [Fe-Al-Ni-Co]	1,04	83,5	5,3	1,1...2,0	30...50	20
3	Самарий-кобальт [SmCo ₅]	0,89	15,4	8,4	5,0...10,0	150...250	1,1
4	Самарий-кобальт [Sm(CoFeCuZn) ₇]	1,08	21,5	8,2	4,8...8,0	200...400	0,9
5	"Неомакс" [Ne ₁₅ Fe ₇₇ B ₈]	1,22	27,9	7,4	2,0...5,0	100...200	0,3

Таблица 7.3. Сравнительные характеристики материалов, используемых для изготовления постоянных магнитов

№ п/п	Материал магнита (отечественный аналог)	Относительные величины		Энергетическое произведение (BH) _{max}	Относительная стоимость	Временная стабильность	Температурный коэффициент Br, (%/°C)	Предельная рабочая температура (точка Кюри), °C
		Остаточная индукция, Br	Коэрцитивная сила, Hc					
1	"Альнико" (ЮНДК)	Высокая	Низкая	Среднее	Высокая	Средняя	-0,02	300±50 (860±20)
2	INDOX (MO-Fe ₂ O ₃)	Низкая	Высокая	Ниже среднего	Низкая	Высокая	-0,2	100
3	Ферриты "Ceramic" (БА, БИ)	Средняя	Средняя	Среднее	Низкая	Высокая	-0,04	400 (450±10)
4	На основе РЗЭ "Hicorex" (Кс 37, КсП 37)	Высокая	Наиболее высокая	Наиболее высокое	Наиболее высокая	Высокая	-0,12	250 (700±10)
5	"Vacodym" "Neomax" (Nd Fe B) (Нм28...Нм32)	Высокая	Высокая	Высокое	Средняя	Высокая	-0,12	190±25 (290±10)

В России наиболее известными производителями постоянных магнитов являются НПО «Магнетон» (г. Владимир), Новочеркасское ПО «Магнит», ОКБ 1-го МПЗ (г. Москва), завод «Электроконтакт» (г. Кинешма) и др., выпускающие магниты в соответствии с ГОСТ 17809-72 («Магниты»), ГОСТ 13598-68 («Магниты металлокерамические»), ГОСТ 21559-76 («Магниты редкоземельные»).

Зарубежные производители изделий микромагнитоэлектроники используют постоянные магниты более чем 50 фирм. Наиболее известными являются: Sumitomo Special Metals Co, Hitachi Metals Ltd., Suwa Seico Co. (все Япония); Hitachi Magnetics Corp., General Motors, General Magnetic (США), Vacuumschmelze GmbH, Siemens, Valvo (Германия), Plessey Co.Ltd, Mullard Overseas Ltd. (Великобритания); Allevard Ugine, RTS la Radiotechnique-Complex (Франция) и др.

В качестве материалов для изготовления постоянных магнитов зарубежными фирмами используются: феррит бария, сплавы альнико, редкоземельные металлы (РЗМ), магнитотвердые материалы, получившие наименование типа «Indox», «Lodex», «Hicorex», «Incor», «Cunife» и др.

Например, фирма «Honeywell» использует магниты более десятка американских фирм в числе которых: Arnold Engineering (керамика FeBa, «Альнико»), General Tire & Rubber (пластик FeBa), Hitachi Magnetics Corp. (керамика FeBa, «Альнико», РЗМ), Indiana General (керамика FeBa, «Альнико», РЗМ), Temgam Engineering Inc. (пластик FeBa), Crucible Magnetic Div. («Альнико», РЗМ), 3M Company (пластик FeBa), Bovee Engineering Sales Co. Inc. (пластик FeBa, РЗМ), Ceramic Magnetics (РЗМ), LNP Corp. (пластик FeBa), TDK Corporation of America (керамика FeBa, РЗМ). [10]

Форма и линейные размеры постоянных магнитов определяют параметры магнитного поля, действующего на магниточувствительный элемент изделий микромагнитоэлектроники. На рис. 7.4 в качестве примера приведены характерные зависимости параметров магнитного поля от линейных размеров ПМ, а на рис. 7.5. показана индикатриса магнитного поля для плоского магнита из сплава SmCo.

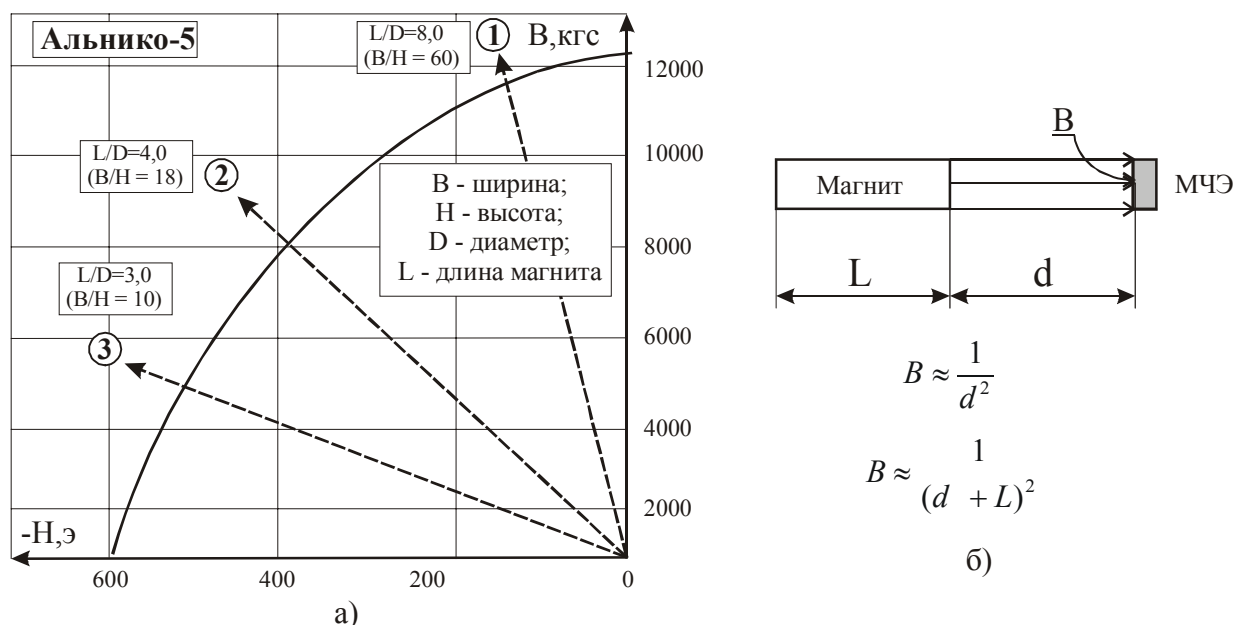
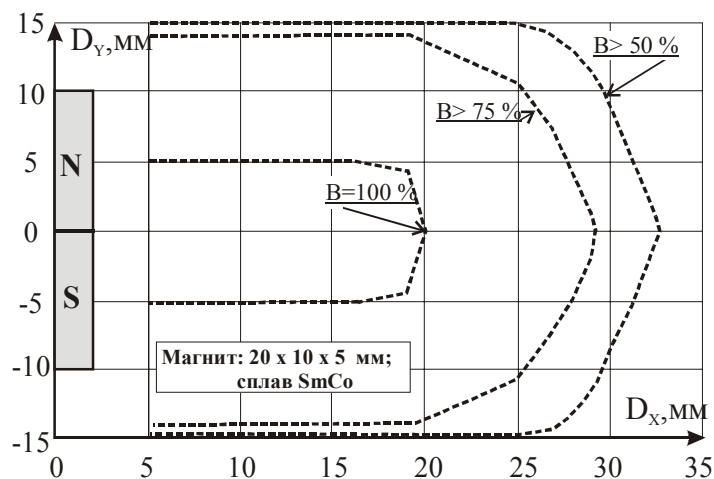


Рис. 7.4. Зависимость параметров магнитного поля плоских и цилиндрических магнитов из сплава «Альнико» от соотношения их линейных размеров - а; и б - зависимость индукции ПМ от расстояния до МЧЭ

Рис. 7.5. Индикатриса магнитного поля для плоского магнита из сплава SmCo



При конструировании магнитных систем для изделий микромагнитоэлектроники возможно использование теоремы подобия.

Теорема подобия позволяют легко и быстро оценивать различные варианты проектируемых магнитных систем, отличающихся лишь размерами (масштабом). При этом все параметры исходной магнитной системы считаются известными. Ниже приводятся основные формулировки теоремы подобия.

1. Геометрически подобные магниты имеют магнитные поля одинаковой конфигурации, если картина поля в теле магнита у них одинакова, а магниты изготовлены из одинаковых материалов.
2. При увеличении всех размеров постоянного магнита в n раз напряженности полей в соответственных точках остаются без изменения, а магнитный поток возрастает в n^2 раз.
3. При увеличении всех размеров электромагнита (ЭМ) в n раз напряженность полей и индукции в соответственных точках остаются без изменений, а магнитный поток возрастает в n^2 раз, если токи питания ЭМ увеличиваются также в n раз. При этом плотность токов уменьшается в n раз, выделение тепла возрастает в n раз, теплоотдача возрастет в n раз и условия охлаждения ЭМ улучшаются также в n раз. Числа витков при этом считаются неизменными.
4. При увеличении всех размеров электромагнита в n раз условия охлаждения и числа витков обмоток должны оставаться неизменными, то токи необходимо увеличить в $n^{3/2}$ раз.
5. При этом напряженность полей и индукции возрастают в \sqrt{n} раз (при отсутствии насыщения), а потребляемая мощность ЭМ возрастает в n^2 раз. [2]

7.2. Концентраторы магнитного поля

Концентраторы магнитного поля используются с целью увеличения ПМП и магнитоприемных устройств. В зависимости от типа ПМП и МЭУ применяются различные конструкции концентраторов МП.

На рис.7.6...7.8, в качестве примера, приведены несколько вариантов конструкций концентраторов, применяемых совместно с тонкопленочными магниторезисторами.

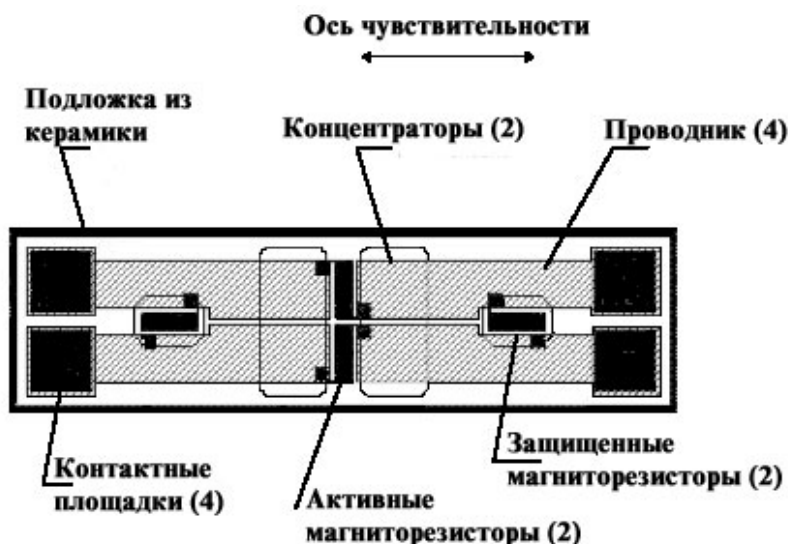


Рис. 7.6. Конструкция бескорпусного тонкопленочного магнитного датчика с встроенными концентраторами, выполненными из ферромагнитной пленки

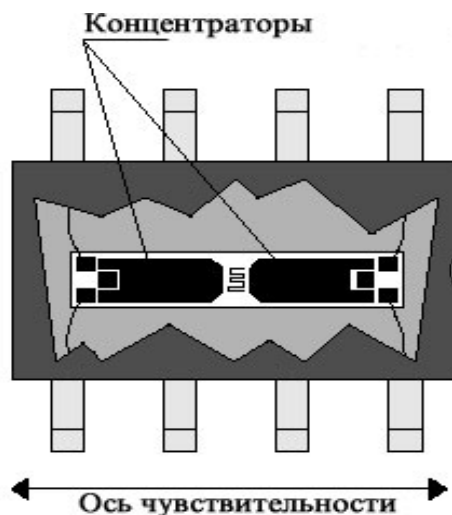


Рис. 7.7. Конструкция магнитного датчика в DIP - корпусе с встроенными концентраторами, выполненными из ферромагнитной пленки

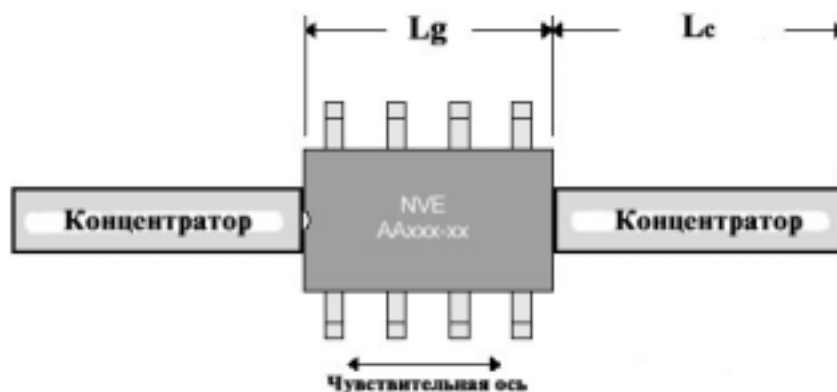


Рис. 7.8. Конструкция магнитного датчика в DIP - корпусе с внешними концентраторами, выполненными из ферромагнитного материала

Коэффициент концентрации (F_c) для конструкции прибора, приведенной на рис. 7.8, определяется по следующей формуле:

$$F_c \approx \frac{L_c}{L_g} \quad (7.2)$$

При разработке магнитоэлектронной аппаратуры наиболее широкое распространение получили концентраторы с использованием стержней из ферромагнитных материалов, обладающих высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой.

Обычно используются два стержня, длина которых в 40...50 раз больше их диаметра. Стержни располагаются с двух сторон магниточувствительного элемента параллельно оптимальному направлению магнитного поля. Концы стержней, примыкающие к элементу, и заостряются таким образом, чтобы размеры вершины конуса были равны размерам магниточувствительной площадки используемого преобразователя магнитного поля. Варианты конструкции концентраторов приведены на рис. 7.9.

Применение подобных концентраторов в ориентационных магнитных датчиках позволяет увеличивать угловую чувствительность МД в 5...100 раз.

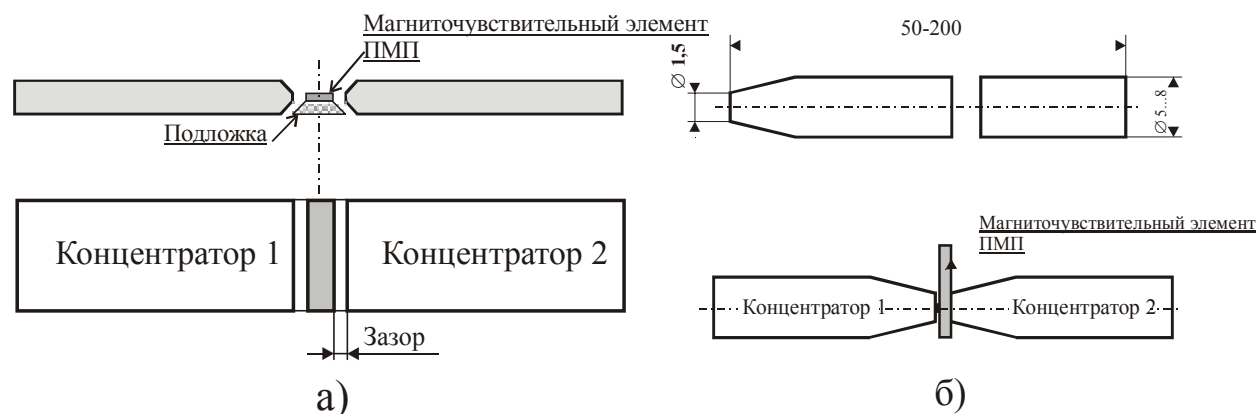


Рис. 7.9. Конструкция цилиндрических концентраторов магнитного поля; а - плоского; б - цилиндрического

Иногда концентраторы магнитного поля используют с целью улучшения геометрической разрешающей способности МД.

На рис. 7.10 приведена конструкция концентратора магнитного поля, предназначенная для использования в составе высокочувствительного датчика скорости вращения зубчатого колеса. Подобные устройства применяются при контроле скорости вращения мелкозубых шестерен.

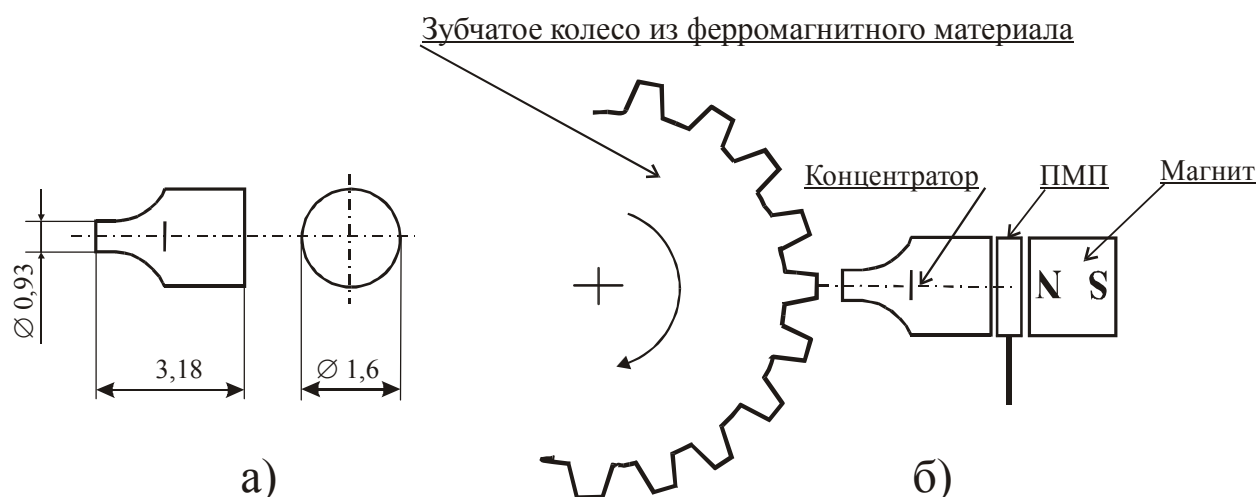


Рис. 7.10. Конструкция концентратора магнитного поля, предназначенная для использования в составе высокочувствительного датчика скорости вращения зубчатого колеса: а - конструкция концентратора; б - схема датчика скорости вращения

Для изготовления концентраторов магнитного потока можно использовать: феррит ($\mu = 2000 \dots 6000$), муметалл (Ni-75%, Fe-18%, Cu-5%, Cr-2%), а также железокобальтовые сплавы: 27КХ, 49К2Ф, 49К2ФВИ (пермендюр), 49К2ФА (суперпермендюр), железоникелевый сплав - пермаллой (79НМ) и др.

Применение концентраторов позволяет увеличить плотность магнитного поля в магнитоочувствительной области. Действие концентраторов сильно ослабевает при увеличении зазора между ними, поэтому его следует сделать минимальным (равным толщине самого магнитоочувствительного элемента). При минимальном зазоре 0,2...0,3 мм достигается увеличение чувствительности в 100... 1000 раз в зависимости от конструкции концентратора.

Следует отметить, что хотя ферромагнитные концентраторы и увеличивают чувствительность магнитоэлектронных устройств, но при этом ухудшается линейность характеристики преобразования. Следовательно, устройства с концентраторами желательно использовать только для индикации магнитного поля.

7.3. Катушки смещения

Катушки смещения являются важным элементом многих изделий микромагнитоэлектроники. Эти катушки, в зависимости от назначения изделий, могут выполнять несколько функций

- компенсация влияния постороннего постоянного магнитного поля;
- «модуляция» магнитного потока;
- выполнение функций управляющего элемента при компенсационном методе измерения индукции магнитного поля.

В зависимости от назначения изделий конструкция катушек смещения может быть различной. На рис. 7.11....7.13 приведены возможные варианты конструктивного оформления катушек смещения, а в таблице 7.4 приведены их основные параметры.

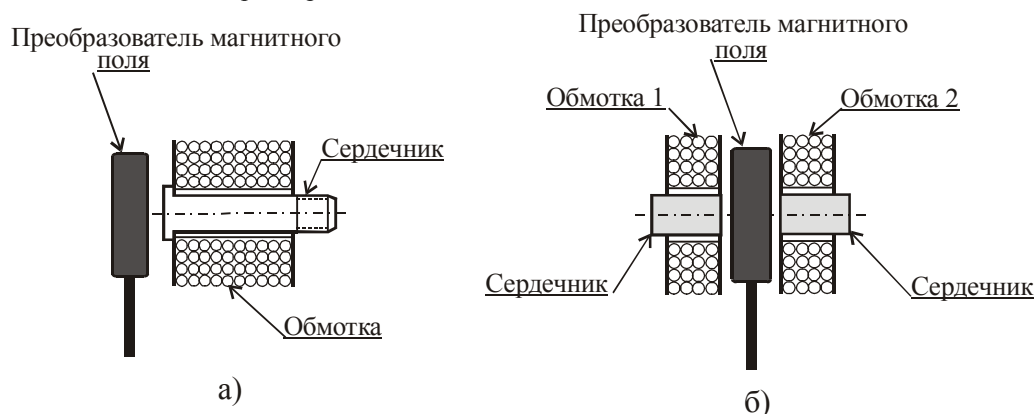


Рис. 7.11. Варианты конструкции катушек смещения, предназначенных для работы в «сильных» магнитных полях.

В катушках (рис. 7.11.а) сердечник изготавливается из магнитомягкого материала. Такие катушки используются при работе в «сильных» магнитных полях. Для более тонких применений используются две (включенные параллельно или последовательно) обмотки (рис.7.11.б) с сердечником из феррита ($\mu = 1000...6000$).

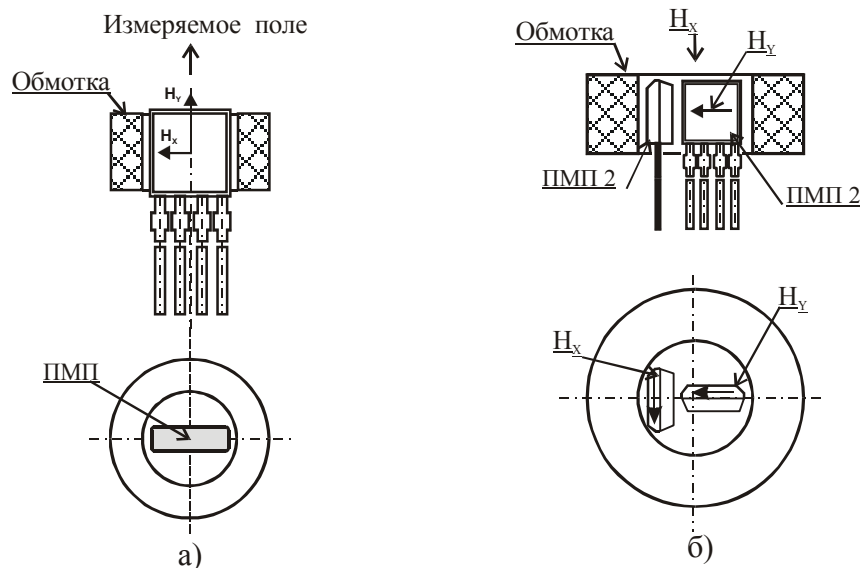


Рис.7.12. Варианты конструкции катушек смещения, предназначенных для компенсации и модуляции магнитного поля: а – для одного МПМ; б - для двух МПМ

Катушки без сердечников (рис. 7.12.а. б.) используются как для «модуляции» магнитного потока, так и для компенсации и смещения магнитного поля.

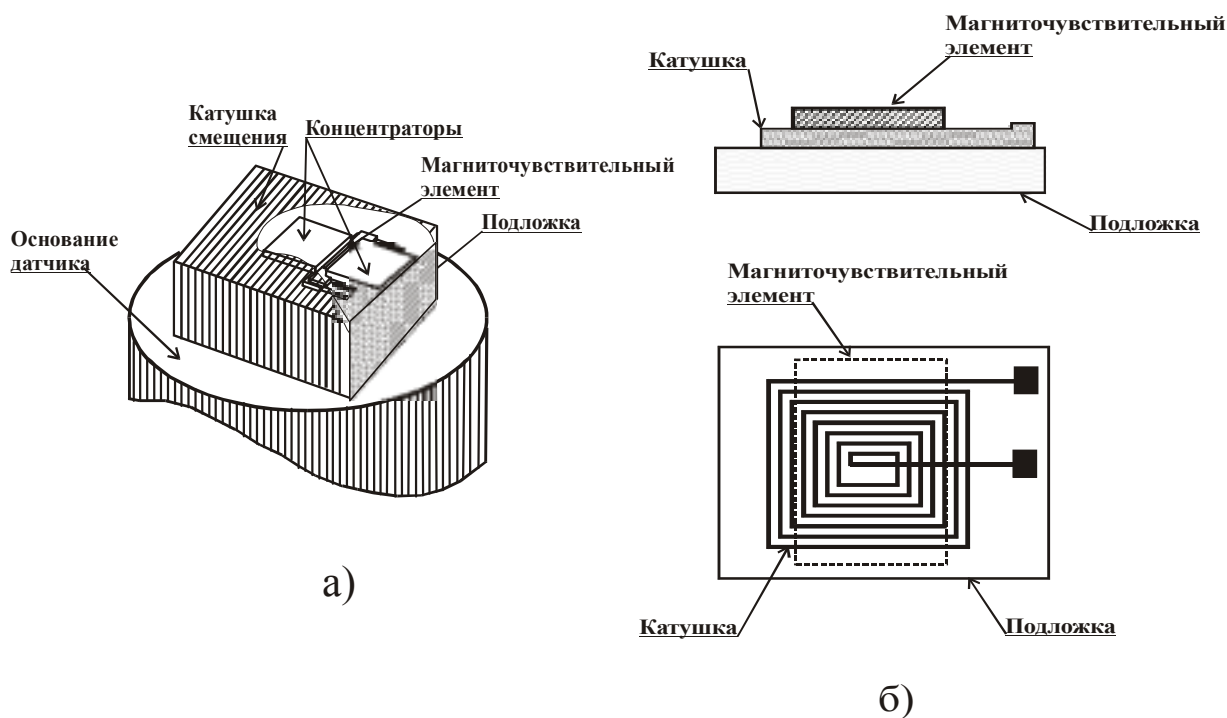


Рис.7.13. Варианты конструкции миниатюрных катушек смещения: а - микроминиатюрная проволоочная; б - тонкопленочная.

Микрокатушки (рис. 7.13) используются в качестве катушек смещения в составе микроэлектронных датчиков магнитного поля, выполненных в виде гибридных интегральных схем. [130]

Кроме того, тонкопленочные катушки (рис. 7.13.б.) используются для «модуляции» магнитного потока. При этом ток модуляции может достигать 4 ампер при длительности импульса 2...5 мкс.

В таблице 7.4 в качестве примера приведены основные параметры нескольких вариантов катушек смещения.

Таблица 7.4. Основные параметры катушек смещения

№ п/п	Рабочий ток, мА	Сопротивление катушки R_K , Ом	Индуктивность катушки L_K , мкГн	Индукция на поверхности сердечника B_K , мТл	Крутизна характеристики, H_b , мТл/мА	Габаритные размеры, мм	Конструкция рис. №№
1	5...20	640	155	3,2...17	0,64...0,85	Ø 8,5x 12	7-11.а
2	10	245	34,5	2,2	0,22	Ø 8,5x 12	7-11.а
3	30...100	35,5	6,5	3,8...12,5	0,11...0,13	Ø 8,5x 12	7-11.а
4	3...20	680	113	2...13,5	0,67...0,68	Ø 8 x 12	7-11.а
5	5...40	440	36 1000 вит. Ø 0,08	0,38...3	0,076	Ø 10 x 6	7-11.б
6	10	18	365 вит. Ø 0,1	0,6	0,06	Ø 20 x 10	7-12.а
7	10	75	720 вит. Ø 0,07	1,26	0,126	Ø 20 x 10	7-12.б
8	5...20	1,4	Н/Д	0,5...2,0	0,1	Н/Д	7-13.а
9	5...20	3	Н/Д	0,0125...0,1	0,0025	ГИС	7-13.б

7.4. Магнитопроводы

Магнитопровод является одним из элементов конструкции изделия микромагнитоэлектроники при помощи которого формируется управляющее магнитное поле. При конструировании магнитопроводов решаются две основные задачи:

- разработка конструкции магнитопровода, связанная с выбором оптимальной его формы, обеспечивающей решение конкретной технической задачи;
- выбор материала для изготовления магнитопровода.

Для изготовления магнитопроводов в основном используются железо и низкоуглеродистая нелегированная электротехническая сталь.

Благодаря высоким магнитным свойствам (высокие магнитная проницаемость и индукция насыщения), высоким механическим и технологическим свойствам и невысокой стоимости, железо широко применяется для изготовления магнитопроводов. Однако вследствие низкого удельного электрического сопротивления железа обуславливающего повышенные потери на вихревые токи, применение его ограничивается только устройствами постоянного тока. Чем чище железо, тем выше его магнитная мягкость.

Наиболее широко применяется технически чистое железо, как наиболее экономичное. Особо чистые сорта железа применяются только для специальных целей.

По магнитным свойствам к технически чистому железу приближается нелегированная электротехническая сортовая (типа: 11880, 21880, 11895, 21985 и др.) и тонколистовая сталь (типа 3411, 3415, 2011, 2112, 2212, 2311, 1212, 1514 и др.)

Для изготовления магнитопроводов также применяют магнитномягкие прецизионные сплавы, обладающие высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой.

Такие сплавы представляют собой нелегированные и легированные двойные железоникелевые, железокобальтовые и железохромистые и тройные железо-никель-кобальтовые сплавы (типа 45Н, 79НМ, 80НХС, 50НП, 81НМА, 40НКМП и др.)

(Подробнее см. [1, 2, 6, 8]).

7.5. Магнитные и термомагнитные шунты

Магнитные шунты в ряде случаев являются управляющими элементами изделий микромагнитоэлектроники. В более общих случаях они практически являются элементами магнитопроводов и изготавливаются из тех же материалов.

Для повышения термической устойчивости изделий микромагнитоэлектроники, содержащих собственные магнитные системы используются, т. н. термомагнитные шунты которые изготавливаются из специальных термомагнитных материалов.

Термомагнитными называются магнитномягкие материалы, обладающие сильной зависимостью магнитной проницаемости от температуры. При увеличении температуры окружающей среды магнитная проницаемость указанного материала падает.

Для изготовления элементов магнитных систем изделий микромагнитоэлектроники могут использоваться следующие термомагнитные сплавы: НЗ3Ю1, ЭП456 (термаллой), 38НХ14, 36НХ11 (компенсатор), НЗ2Х6Ю, ЭП279 и др. [2]

7.6. Магнитные экраны

Наиболее часто экраны выполняют в форме полых цилиндров с отношением наружного диаметра к внутреннему 1,01...1,25 и отношением высоты к наружному диаметру 0,8...1,2. Чаще всего встречаются однослойные и двухслойные экраны. Трёхслойные экраны встречаются крайне редко.

Многослойные экраны имеют больший коэффициент экранирования, чем однослойные той же, толщины, но их изготовление значительно сложнее и дороже. Расчеты, подтвержденные опытом показывают, что при конструировании магнитных экранов следует учитывать следующие обстоятельства:[2]

1. Наиболее совершенной формой экрана является многослойная сфера, состоящая из концентрических слоёв магнитомягкого и немагнитного материалов. Толщины этих слоёв должны по мере удаления от центра возрастать в геометрической прогрессии.
2. При изменении всех размеров экрана в одинаковое число раз степень экранирования остаётся неизменной.
3. Уменьшение размеров экрана при сохранении его толщины увеличивают степень экранирования, но одновременно увеличивается рассеяние магнитного поля защищаемого изделия (если в нем имеется собственный источник магнитного поля).
4. Наличие в экране небольших отверстий мало отражается на степени экранирования, но стыки между частями экрана следует располагать параллельно направлению постороннего (помехонесущего) магнитного поля.
5. Форма экрана мало влияет на степень экранирования. Поэтому экран произвольной формы можно рассчитывать по формулам сферического экрана [2].

Выбор материала для изготовления магнитных экранов

Материал экранов, работающих в сильных магнитных полях, должен отвечать двум основным требованиям: иметь высокую магнитную проницаемость и высокую индукцию «колена» кривой намагничивания.

Этим требованиям отвечают пермендюры - сплавы с выпуклой кривой намагничивания и высокой индукцией насыщения. Для экранов лучше всего подходят супермендюр марки 49К2ФА, у которого $B_k = 2$ Тл, $H_k = 25$ А/м и $\mu_{\text{граб}} = 63000$. Особенностью этого сплава является большая протяженность зоны Релея. Поэтому в диапазоне $H = 0 \dots 8$ А/м магнитная проницаемость постоянна: $\mu_T = \mu_{\text{граб}} = 500$.

Магнитные экраны выполняют также из сплава 49К2ФВИ, имеющего $\mu_{\text{граб}} = (5 \dots 6) \cdot 10^3$ и пермаллоя 79НМ.

Отличным материалом для изготовления эффективных экранов является муметалл (Ni-75%, Fe-18%, Cu-5%, Cr-2%), имеющий $\mu_{\text{граб}}$ до $11 \cdot 10^4$.

В последние годы все большее распространение получают аморфные высокопроницаемые магнитно-мягкие сплавы. Сплав 45НПР-А изготавливается в виде ленты толщиной 30 мкм и шириной 2-3 мм. По магнитным свойствам аморфный сплав 45НПРА близок к высоконикелевым пермаллоям, но в отличие от них может использоваться при поставке без термической обработки и допускает механическую обработку: резку, штамповку, изгиб и т.д. без ухудшения магнитных параметров. Дополнительной термомагнитной обработкой аморфного сплава можно в 2-3 раза понизить коэрцитивную силу и повысить магнитную проницаемость. В слабых полях сплав имеет прямоугольную петлю гистерезиса.

Из узких лент сплава 45НПР-А можно изготавливать плетеные «металлические ткани» и применять их для однослойного (или многослойного) магнитного экранирования в виде гибких оболочек, покрытых резиной или пластиком. При необходимости можно производить фиксацию формы магнитного экрана пропиткой полимерными материалами.[2]

7.7. Корпуса изделий микромагнитоэлектроники

Основной задачей при проектировании изделий микромагнитоэлектроники является оптимальный выбор материала корпуса.

Выбор материала корпуса регламентируется назначением прибора, используемой технологией изготовления и условиями его эксплуатации, а также стоимостью в процессе производства и реализации.

Для изготовления несущих рамок изделий микромагнитоэлектроники, реализованных в виде интегральных схем, широко используются ковар (29НКВИ). Выводные рамки высокочувствительных МУМ и МЧМС изготавливаются из немагнитного сплава типа нейзильбер МНЦ15-20 (сплав Cu-Ni-Zn).

Корпуса МУМ и МЧМС обычно изготавливают из термореактивных прессматериалов или керамики (бериллиевая керамика, керамика типа 22ХС и др.).

Корпуса магнитных датчиков и др. подобных изделий, как правило, выполняются из немагнитных материалов: термореактивной пластмассы (полистиролов, полиамидов), прессматериала типа АГ-4, капролона, алюминиевых сплавов (например, АД, АД1, Д16, АМц), латуни (Л62), нержавеющей стали (Х18Н10Т), гиперника (Fe-72%, Ni-28%, $\mu_r \ll 1,01$) и др.

7.8. Элементы связи

Изделия микромагнитоэлектроники, содержат много различных элементов, передающих механическое воздействие от объекта контроля (или управления) к чувствительному элементу изделий.

К таким элементам относятся различного рода рычаги, поводки, валы, штоки, поршни и плунжеры, тонармы, валы, муфты, пружины, карданные подвесы и др.

Все эти элементы разрабатываются, как правило, вместе с конкретными магнитоэлектронными устройствами с учетом конкретных условий эксплуатации. От этого зависят и выбор материала и конструкция таких элементов.

Список литературы к главе 7

1. Агейкин Д.И., Костина Е.Н., Кузнецова Н.Н. Датчики контроля и регулирования. Справочные материалы. - М.: Машиностроение, 1965. - 928 с.
2. Альтман А.Б., Верниковский Э.Е. и др. Постоянные магниты. Справочник. Под общей редакцией Пятин Ю.М. -М: Энергия, 1980. - 488 с.
3. Арнольд Р.Р. Расчет и проектирование магнитных систем с постоянными магнитами. М., Энергия, 1969, 262 с.
4. Афанасьев Ю.В. и др. Средства измерения параметров магнитного поля. - Л: Энергия, 1979. - 320 с.
5. Гриднев А.И. и др. Эффективность применения магнитотвёрдых материалов для постоянных магнитов и магнитных систем электротехнических устройств. Электротехническая промышленность. Сер. 20. Электротехнические материалы. Электроизоляционные и электроугольные изделия. Обзор. информ. - Вып. 6. -М: Информэлектро, 1989. - 52 с.
6. Келин Н.А., Кудрявцев В.К. Методы и устройства для контроля магнитных свойств постоянных магнитов. - М: Энергоатомиздат, 1984. - 80 с.
7. Микросхемы Холла серии K1116КП. «ГИПЕРОН». - М.: 1991 г. 58 с.
8. Справочник по электротехническим материалам. В 3-х томах. Под ред. Корицкого Ю.В. и др. Т.3. Изд. 2-е, перераб. - Л.: Энергия, 1976. - 896 с.
9. Components and materials. Permanent magnet materials. Data handbook. Philips. 1976. p.p.27-128 (Каталог фирмы «Philips»).
10. Hall Effect Transducers. How to apply them as sensors. MICRO SWITCH a Honeywell Division, 1988. - 280 с.
11. MICRO SWITCH. Sensing and Control. Solid State Sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1997. -124 p.
12. Microelectronic Integrated System. Applications and Databook. «Melexis». 1999. -116 p.
13. One-axis magnetoresistive microcircuit. HMC1001. Honeywell. 1995. (Проспект фирмы «Honeywell»).
14. Solid State Sensors. Position, current, flow, liquid level and temperature sensors. Catalogue E20. Honeywell. 1989, -91 p.
15. Two-axis magnetoresistive microcircuit. HMC1002. Honeywell. 1995. (Проспект фирмы «Honeywell»).

Глава 8. Измерение основных параметров преобразователей магнитного поля

Измерение основных параметров преобразователей магнитного поля, МЧМС и МУМ вне условий их производства может производиться с использованием стандартных измерительных приборов и нестандартного источника магнитного поля.

В качестве источника магнитного поля могут быть использованы электромагниты, конструкция которых приведена на рис. 8.1.

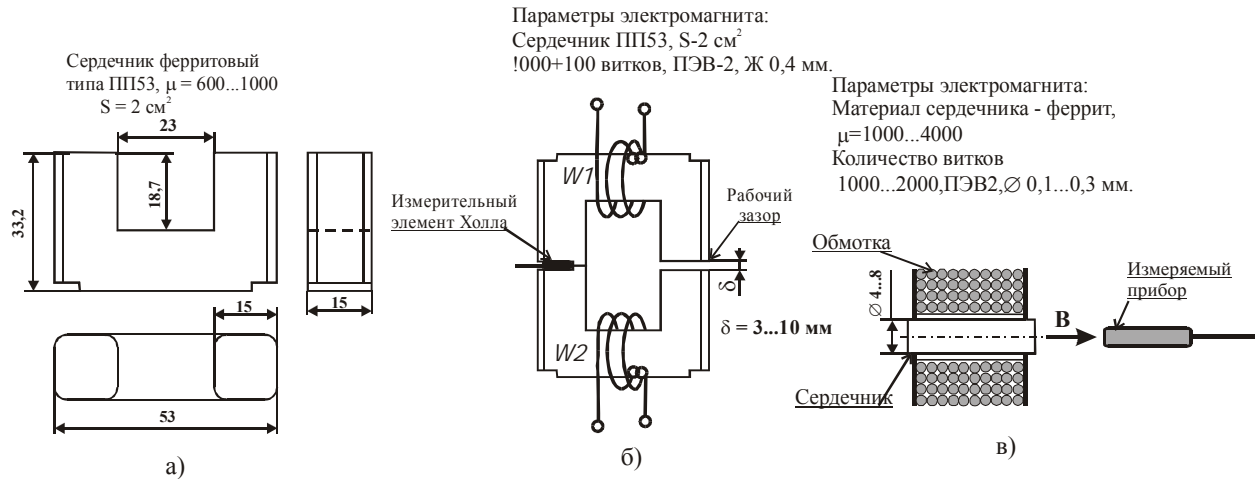


Рис. 8.1. Конструкция нестандартного источника магнитного поля: а - П-образный сердечник; б – измерительный электромагнит для МЧЭ с «поперечной» чувствительностью и малогабаритных приборов с «продольной»; в - магнит для МЧЭ с продольной чувствительностью

Перед использованием измерительный электромагнит обязательно калибруют. Для чего собирают простейшую схему, приведенную на рис. 8.2.

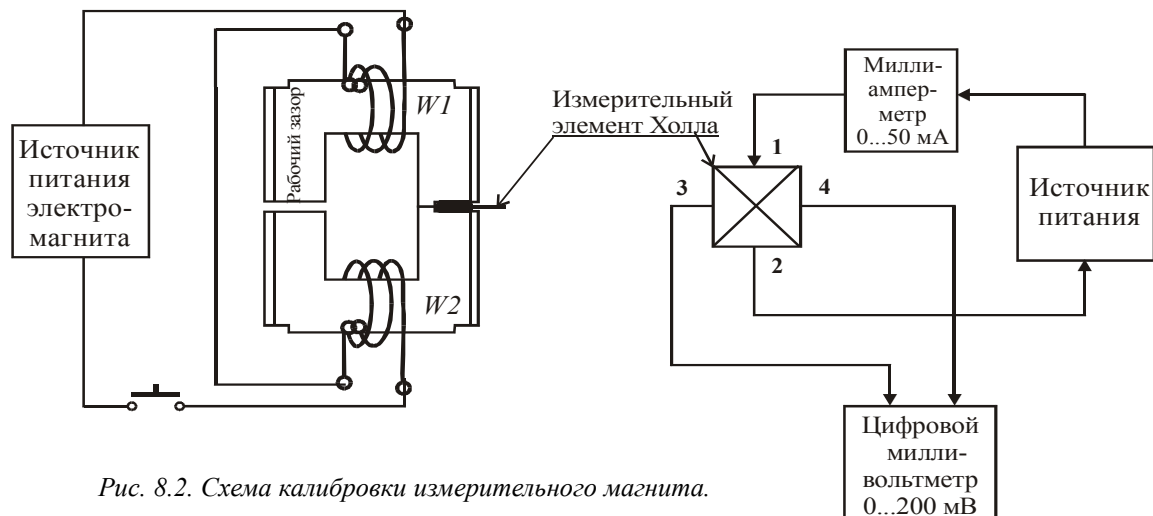


Рис. 8.2. Схема калибровки измерительного магнита.

Схема (рис. 8.2) не требует особых пояснений. В качестве измерительного элемента Холла используют любой датчик Холла, (например, ДХК 0,5) с известными параметрами. Датчик устанавливают в дополнительный зазор электромагнита (рис. 8.1.б) или прикрепляют на поверхности сердечника, в случае использования «продольного» магнита (рис. 8.1.в). Через элемент Холла пропускают номинальный ток управления ($I_{уп.ном}$), и милливольтметром измеряют остаточное напряжение (V_0). Подают питание на электромагнит и измеряют э.д.с. Холла (V_H). Величину индукции (в рабочем зазоре или на поверхности ЭМ), рассчитывают по формуле:

$$B = \frac{S_U}{(V_H - V_0)} \text{, мТл} \quad (8.1)$$

где S_U - чувствительность элемента Холла при $I_{уп.ном}$, мВ/мТл;

V_0 - остаточное напряжение, мВ;

V_H - э.д.с. Холла, мВ.

Величина магнитной индукции в рабочем зазоре может измеряться внешним магнитометром (например, ЭМЦ2-21), а затем контролироваться при помощи «измерительного» элемента Холла (рис. 8.2).

8.1. Измерение основных параметров элементов Холла

Для измерения основных параметров элементов Холла может использоваться устройство, структурная схема которого приведена на рис. 8.3.

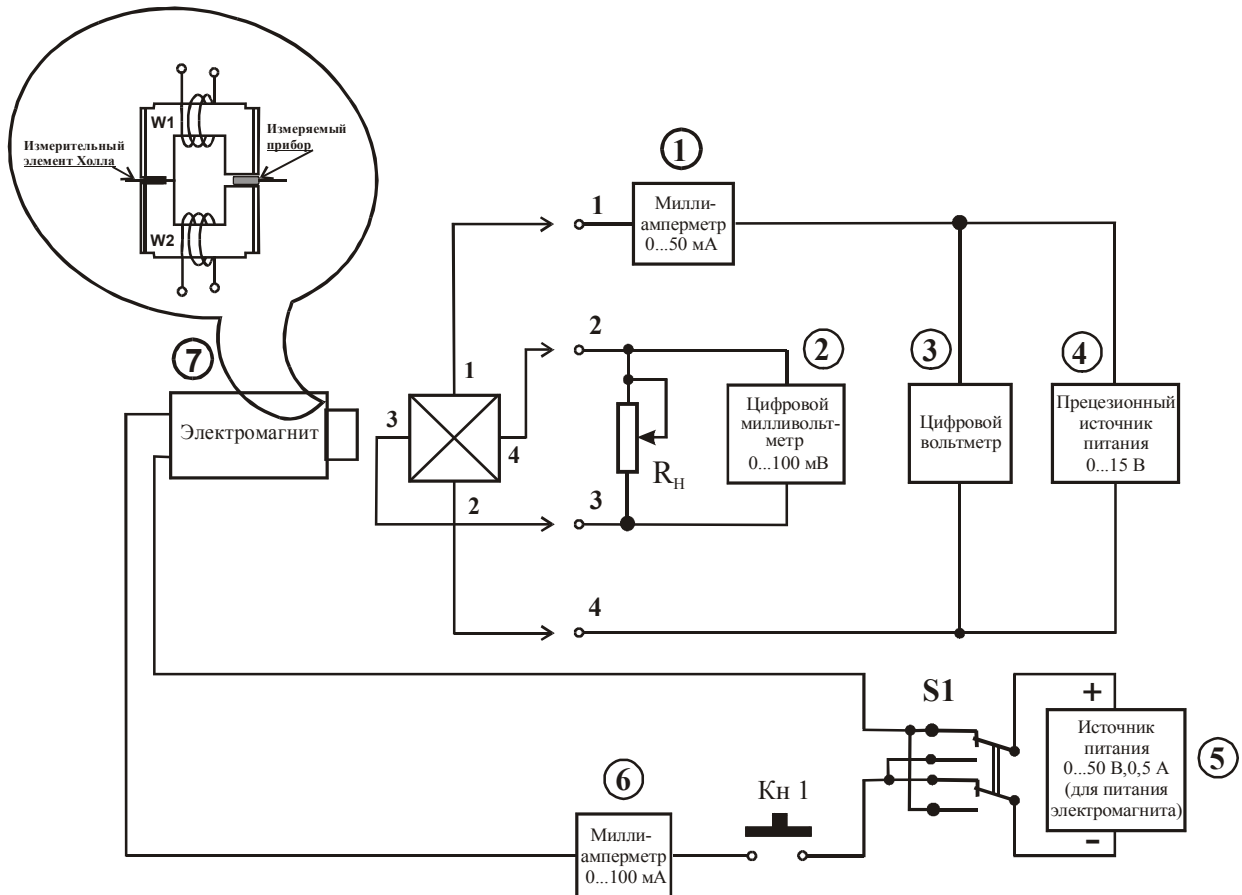


Рис. 8.3. Структурная схема устройства для измерения основных параметров элементов Холла.

В качестве источника управляющего магнитного поля используется электромагнит, конструкция которого приведена на рис. 8.1.б. Тумблер S1 служит для переключения направления магнитного потока ЭМ.

Порядок измерения параметров элемента Холла.

1. Элемент Холла подключается к схеме, приведенной на рис.8.3. При этом «токовые» выводы ЭХ подключаются к клеммам 1 и 4. Если на ЭХ отсутствует документация, то «токовые» выводы можно определить по минимальному сопротивлению между ними. Сопротивление между «токовыми» выводами несимметричного ЭХ всегда в 1,5...5 раз меньше, чем между «измерительными». У симметричного ЭХ эти сопротивления практически равны.

2. Устанавливается сопротивление нагрузки $R_H = R_{\text{ОПТ}}$. Величина R_H выбирается исходя из требований необходимой линейности преобразования.

3. От источника 4 через миллиамперметр 1 на элемент Холла подается напряжение питания. Рабочий режим работы ЭХ устанавливается по величине тока управления ($I_{\text{уп}}$), контролируется миллиамперметром 1.

4. При помощи милливольтметра 2 измеряется остаточное Холловское напряжение ($U_{\text{ОСТ}}$).

Величина $U_{\text{ОСТ}}$, в зависимости от конкретных условий применения ЭХ, может измеряться как в режиме холостого хода ($R_H = \infty$), так и при $R_H = R_{\text{ОПТ}}$.

Входное сопротивление милливольтметра ($R_{\text{ВХ.1}}$) должно быть много больше, чем выходное сопротивление элемента Холла. ($R_{\text{ВХ.1}} \gg 10R_{\text{ВЫХ.ЭХ}}$).

5. Нажимают кнопку Kn1 и при помощи источника питания 5 устанавливают необходимую величину индукции управляющего магнитного поля В. Величину В контролируют при помощи внешнего измерителя магнитной индукции. При достижении заданной величины В, при помощи миллиамперметра 6 фиксируют величину тока, проходящего через электромагнит 7. Затем кнопку Kn1 отпускают.

6. Элемент Холла помещают в рабочий зазор электромагнита 7 и нажимают кнопку Kn1. При нажатой кнопке милливольтметром 2 измеряют напряжение сигнала ($U_{\text{ВЫХ}}$) на выходе ЭХ.

7. Магнитную чувствительность ЭХ ($\gamma_{\text{ЭХ}}$) определяют по следующей формуле:

$$\gamma_{\text{ЭХ}} = \frac{(U_{\text{вых}} - U_{\text{ост}})}{B}, \text{ мВ/мТл или (В/Тл)} \quad (8.2)$$

8. Удельную магнитную чувствительность ЭХ ($\gamma_{\text{уд.ЭХ}}$) определяют по формуле:

$$\gamma_{\text{уд.ЭХ}} = \frac{\gamma_{\text{ЭХ}}}{I_{\text{уп}}}, \text{ мВ/ (мТл*мА) или (В/(Тл*А))} \quad (8.3)$$

8.2. Измерение основных параметров магниторезисторов

Для измерения основных параметров магниторезисторов могут использоваться устройства, структурные схемы которых приведены на рис.8.4 и 8.5

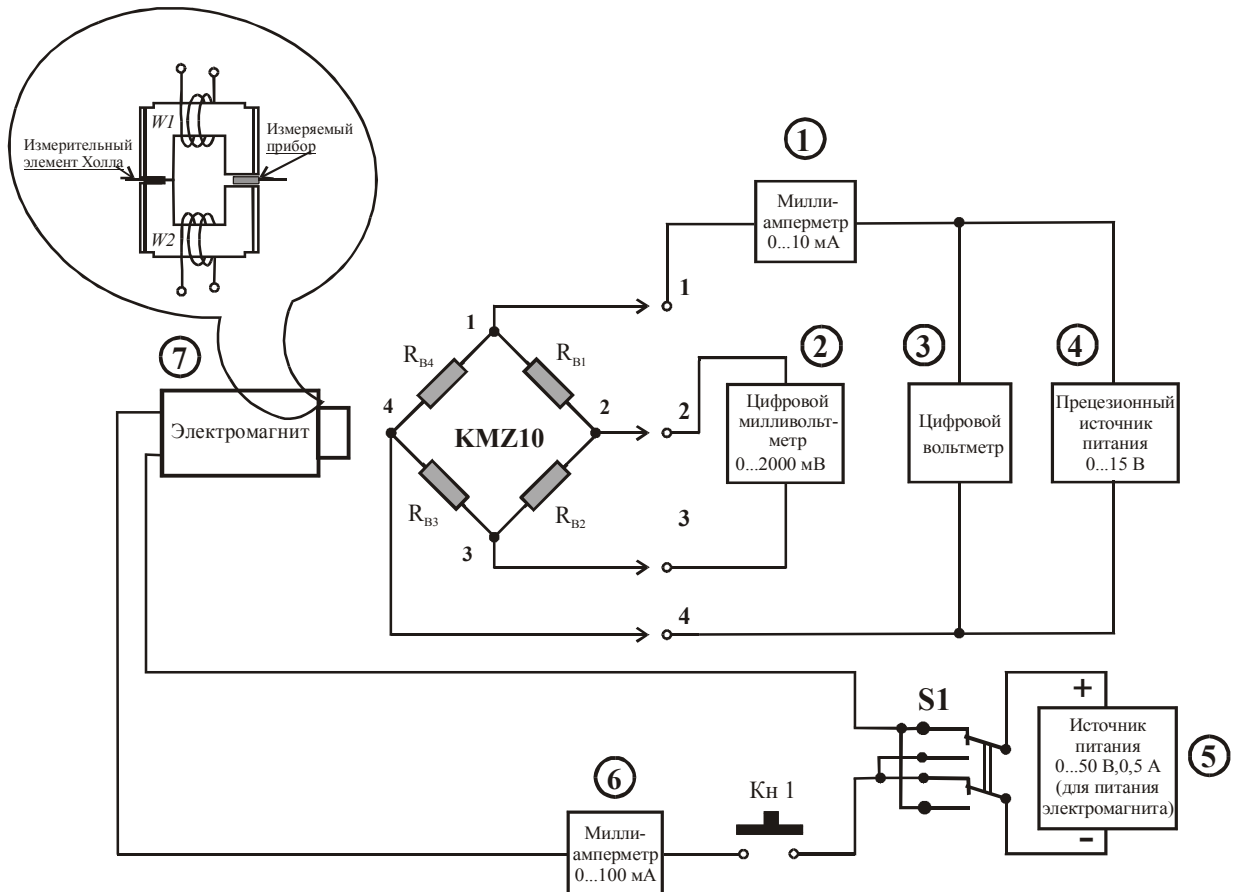


Рис. 8.4. Структурная схема устройства для измерения основных параметров магниторезисторного моста

8.2.1. Измерение параметров магниторезисторного моста

На рис. 8.4 приведена структурная схема для измерения основных параметров магниторезисторного моста (например, типа KMZ10). В качестве источников управляющего магнитного поля могут использоваться электромагниты, конструкции которых приведены на рис. 8.1. Величина магнитной индукции в рабочем зазоре или в плоскости МЧЭ измеряется внешним магнитометром (например, ЭМЦ2-21), а затем контролируется при помощи «измерительного» элемента Холла (рис. 8.2) или по току через электромагнит. Тумблер S1 служит для переключения направления магнитного потока ЭМ.

Порядок измерения параметров магниторезисторного моста.

1. Мост подключается к схеме, приведенной на рис. 8.4.
2. От источника 4 через миллиамперметр 1 на мост подается напряжение питания. Рабочий режим работы моста устанавливается по величине тока управления ($I_{\text{уп}}$) или рабочего напряжения ($U_{\text{п}}$), контролируется миллиамперметром 1 или вольтметром 3.

3. При помощи милливольтметра 2 измеряется напряжение (U_0) на выходе моста при $B=0$.

Величина U_0 , в зависимости от конкретных условий применения моста, может измеряться как в режиме холостого хода ($R_H = \infty$) или при $R_H = R_{\text{опт}}$.

Входное сопротивление милливольтметра ($R_{\text{вх.1}}$) должно быть много больше, чем выходное сопротивление моста. ($R_{\text{вх.1}} \gg 10R_{\text{вых.м.}}$).

4. Нажимают кнопку Кн1 и при помощи источника питания 5 устанавливают необходимую величину индукции управляющего магнитного поля B . Величину B контролируют при помощи внешнего измерителя магнитной индукции. При достижении заданной величины B , при помощи миллиамперметра 6 фиксируют величину тока, проходящего через электромагнит 7. Затем кнопку Кн1 отпускают.

5. Мост помещают в рабочий зазор электромагнита 7 и нажимают кнопку Кн1. При нажатой кнопке Кн1 милливольтметром 2 измеряют напряжение сигнала ($U_{\text{вых.м}}$) на выходе моста.

6. Магнитную чувствительность моста (γ_M) определяют по следующей формуле:

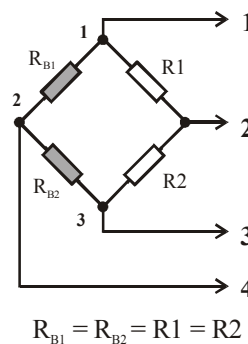
$$\gamma_M = \frac{(U_{\text{вых.м}} - U_0)}{B}, \text{ мВ/мТл или (В/Тл)} \quad (8.4)$$

7. Удельную магнитную чувствительность моста ($\gamma_{\text{уд.м}}$) определяют по формуле:

$$\gamma_{\text{уд.м}} = \frac{\gamma_M}{I_{\text{уп}}}, \text{ мВ/(мТл*мА) или (В/(Тл*А))} \quad (8.5)$$

Примечание: Измерение параметров дифференциальных магниторезисторов производится по той же методике, что и магниторезисторного моста. Для этого дифференциальный магниторезистор включается в схему моста (рис. 8.5).

Рис. 8.5. Схема включения дифференциального магниторезистора.



8.2.2. Измерение параметров единичного магниторезистора

На рис. 8.6 приведена структурная схема для измерения основных параметров магниторезистора. В качестве источника управляющего магнитного поля могут использоваться электромагниты, конструкции которых приведены на рис. 8.1. Величина магнитной индукции в рабочем зазоре или в плоскости МЧЭ измеряется внешним магнитометром (например, ЭМЦ2-21), а затем контролируется при помощи «измерительного» элемента Холла (рис. 8.2) или по току через электромагнит. Тумблер S1 служит для переключения направления магнитного потока ЭМ.

Порядок измерения параметров единичного магниторезистора.

1. Магниторезистор последовательно с сопротивлением нагрузки подключается к схеме, приведенной на рис. 8.6.

2. Устанавливается сопротивление нагрузки $R_H = R_{\text{опт}}$. Величина R_H выбирается исходя из требований необходимой линейности преобразования.

3. От источника 4 через миллиамперметр 1 на цепочку R_B - R_H подается напряжение питания. Рабочий режим магниторезистора устанавливается по величине тока управления ($I_{\text{уп}}$) и контролируется миллиамперметром 1.

4. При помощи милливольтметра 2 измеряется напряжение ($U_{0,MR}$) на выходе магниторезистора при $B=0$.

Входное сопротивление милливольтметра ($R_{\text{вх.1}}$) должно быть много больше, чем величина параллельно включенных R_B и R_H . ($R_{\text{вх.1}} \gg 10R_H$).

5. Нажимают кнопку Кн1 и при помощи источника питания 5 устанавливают необходимую величину индукции управляющего магнитного поля B . Величину B контролируют при помощи внешнего измерителя магнитной индукции. При достижении заданной величины B , при помощи миллиамперметра 6 фиксируют величину тока, проходящего через электромагнит 7. Затем кнопку Кн1 отпускают.

6. Магниторезистор помещают в рабочий зазор электромагнита 7 и нажимают кнопку Кн1. При нажатой кнопке Кн1 милливольтметром 2 измеряют напряжение сигнала ($U_{\text{вых.м.р}}$) на выходе цепочки R_B - R_H .

7. Магнитную чувствительность магниторезистора (γ_{MR}) определяют по следующей формуле:

$$\gamma_{MR} = \frac{(U_{\text{вых.м.р}} - U_{MR0})}{B}, \text{ мВ/мТл или (В/Тл)} \quad (8.6)$$

8. Удельную магнитную чувствительность магниторезистора ($\gamma_{уд.MR}$) определяют по формуле:

$$\gamma_{уд.MR} = \frac{\gamma_{MR}}{I_{уп}}, \text{ мВ/ (мТл*мА) или (В/(Тл*А))} \quad (8.7)$$

Примечание: Измерение таких параметров магниторезисторов как магниторезисторное отношения R_B/R_0 (в %) и относительная магнитная чувствительность $\gamma_{отн}$ (в о.е.) в практических целях, как правило, используются очень редко.

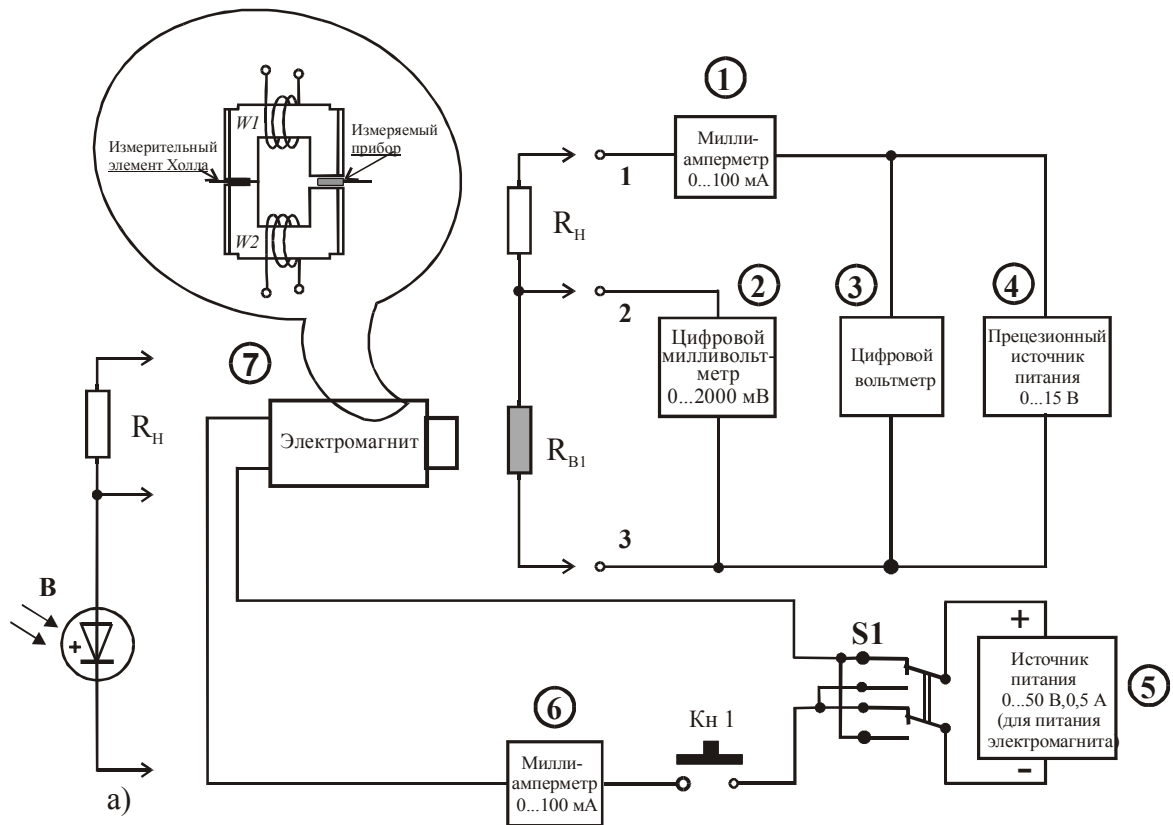


Рис. 8.6. Структурная схема устройства для измерения основных параметров единичных магниторезистора и магнитодиодов (а)

8.3. Измерение параметров магнитодиодов

Для измерения параметров магнитодиодов так же может использоваться устройство, структурная схема которого приведена на рис.8.6.

Порядок измерения параметров магнитодиода.

1. Магнитодиод последовательно с сопротивлением нагрузки подключается к клеммам 1-2-3 схемы, приведенной на рис. 8.6 и 8.6.а.

2. Устанавливается сопротивление нагрузки $R_H = R_{отп.}$. Величина R_H выбирается исходя из требований необходимой линейности преобразования или максимальной чувствительности МД.

3. От источника 4 через миллиамперметр 1 на цепочку $R_{МД} - R_H$ подается напряжение питания. Рабочий режим магнитодиода устанавливается по величине тока управления ($I_{уп}$) и контролируется миллиамперметром 1.

4. При помощи милливольтметра 2 измеряется напряжение ($U_{0.МД}$) на выходе магнитодиода при $B=0$.

Входное сопротивление милливольтметра ($R_{вх.1}$) должно быть много больше, чем величина параллельно включенных $R_{МД}$ и R_H . ($R_{вх.1} \gg 10R_H$).

5. Нажимают кнопку Кн1 и при помощи источника питания 5 устанавливают необходимую величину индукции управляющего магнитного поля B . Величину B контролируют при помощи внешнего измерителя магнитной индукции. При достижении заданной величины B , при помощи миллиамперметра 6 фиксируют величину тока, проходящего через электромагнит 7. Затем кнопку Кн1 отпускают.

6. Магнитодиод помещают в рабочий зазор электромагнита 7 и нажимают кнопку Кн1. При нажатой кнопке Кн1 милливольтметром 2 измеряют напряжение сигнала ($U_{вых.МД}$) на выходе цепочки $R_{МД} - R_H$.

7. Магнитную чувствительность магнитодиода (γ_{MD}) определяют по следующей формуле:

$$\gamma_{MD} = \frac{(U_{вых.MD} - U_{MD0})}{B}, \text{ мВ/мТл или (В/Тл)} \quad (8.8)$$

8. Удельную магнитную чувствительность магниторезистора ($\gamma_{уд}$) определяют по формуле:

$$\gamma_{уд.MD} = \frac{\gamma_{MD}}{I_{уп}}, \text{ мВ/(мТл*мА) или (В/(Тл*А))} \quad (8.9)$$

Примечание: Некоторые типы магнитодиодов обладают асимметричной чувствительностью, зависящей от полярности приложенного напряжения, поэтому необходимо изменить полярность подключения магнитодиода к клеммам 2-3 на обратную, и повторить п.п.2....8.

8.4. Измерение параметров магниточувствительных ИС

Для измерения параметров магниточувствительных микросхем можно использовать стенд, структурная схема которого приведена на рис. 8.7.

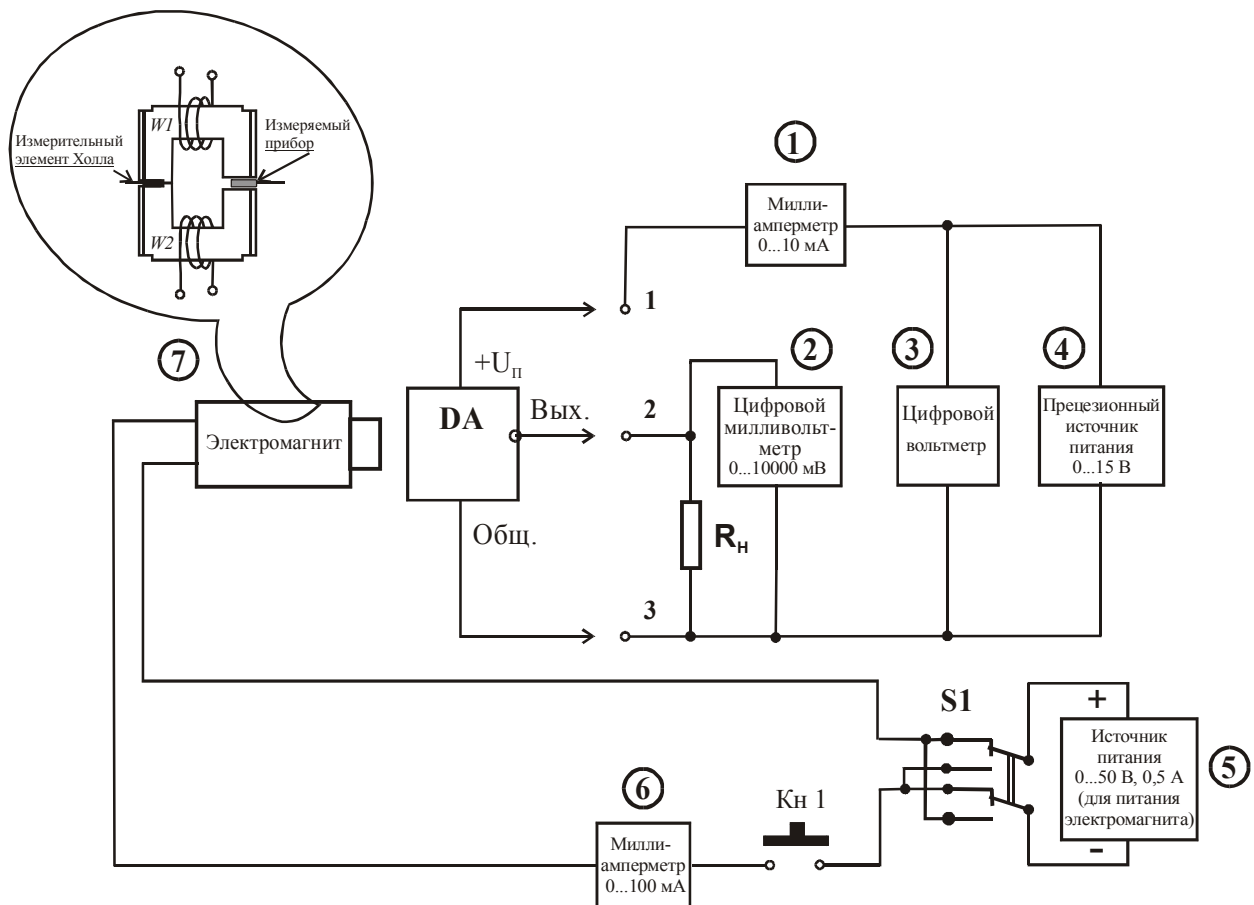


Рис. 8.7. Структурная схема стенда для измерения параметров магниточувствительных микросхем.

В качестве источника управляющего магнитного поля может использоваться электромагнит, конструкция которого приведена на рис. 8.1. Величина магнитной индукции в рабочем зазоре или в рабочей плоскости МЧМС измеряется внешним цифровым магнитометром (например, ЭМЦ2-21), а затем контролируется при помощи «измерительного» элемента Холла (рис. 8.2) или по току через электромагнит. Тумблер S1 служит для переключения направления магнитного потока ЭМ.

Порядок измерения параметров магниточувствительной ИС.

1. Магниторезистор последовательно с сопротивлением нагрузки подключается к схеме, приведенной на рис. 8.7.

2. Величина R_n выбирается исходя из требований технической документации на микросхему.

3. От источника 4 через миллиамперметр 1 на микросхему подается напряжение питания. Рабочий режим микросхемы устанавливается по величине номинального напряжения ($U_{п.ном}$). Величина тока потребления (I_n) и контролируется миллиамперметром 1.

4. При помощи милливольтметра 2 измеряется напряжение (U_0) на выходе микросхемы при $B=0$.

Входное сопротивление милливольтметра ($R_{вх.1}$) должно быть много больше, чем величина R_H ($R_{вх.1} > 10R_H$).

5. Нажимают кнопку Кн1 и при помощи источника питания 5 устанавливают необходимую величину индукции управляющего магнитного поля B . Величину B контролируют при помощи внешнего измерителя магнитной индукции. При достижении заданной величины B , при помощи миллиамперметра 6 фиксируют величину тока, проходящего через электромагнит 7. Затем кнопку Кн1 отпускают.

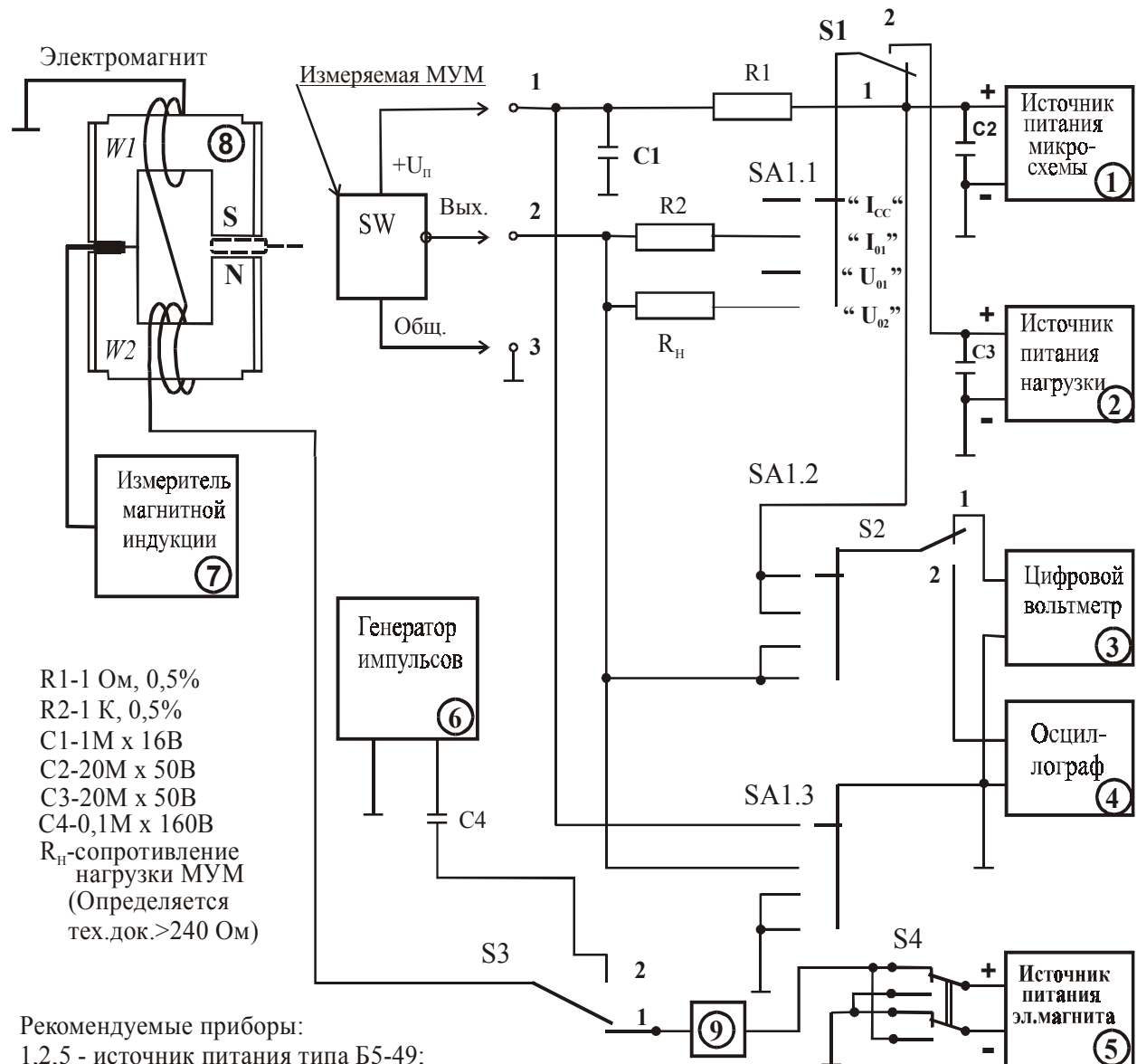
6. Микросхему помещают в рабочий зазор электромагнита 7 и нажимают кнопку Кн1. При нажатой кнопке Кн1 милливольтметром 2 измеряют напряжение сигнала ($U_{вых.}$) на выходе микросхемы.

7. Магнитную чувствительность МЧМС (S_U) определяют по формуле:

$$S_U = \frac{(U_{вых.} - U_0)}{B}, \text{ мВ/мТл или (В/Тл)} \quad (8.10)$$

8.5. Измерение параметров магнитоуправляемых ИС

На рис. 8.8 приведена структурная схема стенда для измерения параметров магнитоуправляемых микросхем серии К1116.



Рекомендуемые приборы:

- 1,2,5 - источник питания типа Б5-49;
- 3 - универсальный вольтметр типа В7-34;
- 4 - осциллограф универсальный типа С1-114;
- 6 - генератор низкочастотный ГЗ-109;
- 7 - измеритель магнитной индукции типа ЭМЦ 2-21;
- 8 - электромагнит измерительный;
- 9 - миллиамперметр 0...100 мА.

Рис. 8.8. Структурная схема стенда для измерения параметров магнитоуправляемых микросхем серии К1116

В качестве источника управляющего магнитного поля может использоваться электромагнит, конструкции которого приведена на рис. 8.1. Величина магнитной индукции в рабочем зазоре или в рабочей плоскости МУМ измеряется внешним магнитометром 7 или по току через электромагнит - при помощи миллиамперметра 9. Тумблер S4 служит для переключения направления магнитного потока ЭМ.

В качестве примера приведем методику измерения параметров микросхем типа K1116КПЗ, K1116КП4, K1116КП7, K1116КП8.

Порядок измерения параметров МУМ:

Установить на источнике питания 1 напряжение $U_{cc} = U_{sw}$, указанное в технической документации на МУМ. Переключатель S1 установить в положение «1».

Если $U_{cc} \neq U_{sw}$, то подают напряжение от двух источников питания (1 и 2). В этом случае на источнике 1 устанавливают напряжение U_{cc} , а на источнике 2 - напряжение U_{sw} .

2. Измерение выходного напряжения высокого уровня (U_{OH}) микросхемы проводят в следующей последовательности:

- переключатель SA1 устанавливается в положение « U_{02} », а переключатели S2 и S3 - в положение «1»;
- показания снимаются по вольтметру 3.

3. Измерение выходного напряжения низкого уровня (U_{OL}) микросхемы проводят в следующей последовательности:

- переключатель SA1 устанавливается в положение « U_{01} », а переключатели S2 и S3 - в положение «1»;

Примечание: для микросхем K1116КП4 переключатель SA1 устанавливается в положение « U_{02} ».

- показания снимаются по вольтметру 3.

4. Измерение тока потребления (I_{cc}) при высоком уровне выходного напряжения проводится в следующей последовательности:

- переключатель SA1 устанавливается в положение « I_{cc} », а переключатели S2 и S3 - в положение «1»;
- показания снимаются по вольтметру 3. Показания прибора 3 в милливольтмах (мВ) соответствуют току потребления в миллиамперах (мА), т.к. измеряется падение напряжения на резисторе R1.

5. Измерение выходного тока высокого уровня (I_{OH}) микросхемы проводят в следующей последовательности:

- переключатель SA1 устанавливается в положение « I_{01} », а переключатели S2 и S3 - в положение «1»;
- показания снимаются по вольтметру 3. Показания прибора 3 в милливольтмах (мВ) соответствуют току высокого уровня в микроамперах (мкА), т.к. измеряется падение напряжения на резисторе R2.

6. Измерение индукции срабатывания (B_{op}) и индукции отпускания (B_{rp}) проводятся в следующей последовательности:

- переключатель SA1 устанавливается в положение « U_{01} », а переключатели S2 и S3 - в положение «1»;
- измеряемую микросхему помещают в рабочий зазор электромагнита 8 (величину магнитной индукции контролируют прибором 7);

- плавно (вращением ручек установки напряжения источника 5) увеличивают напряжение питания электромагнита 8;

- в момент резкого уменьшения выходного напряжения, контролируемого по вольтметру 3, фиксируют значение индукции срабатывания (B_{op}) по показаниям измерителя индукции 7;

- плавно (вращением ручек установки напряжения источника 5) уменьшают напряжение питания электромагнита 8;

- в момент резкого увеличения выходного напряжения, контролируемого по вольтметру 3, фиксируют значение индукции отпускания (B_{rp}) по показаниям измерителя индукции 7;

7. Измерение времени включения (t_{THL}) и выключения (t_{TLH}) проводится в следующей последовательности:

- переключатель SA1 устанавливается в положение « U_{01} », а переключатели S2 и S3 - в положение «2»;

- измеряемую микросхему помещают в рабочий зазор электромагнита 8;

- на выходе генератора 6 устанавливают максимальное напряжение, (но не более 80 В);

- изменением частоты (в пределах 100...1000 Гц) генератора 6 добиваются на экране осциллографа 4 сигнала, имеющего форму, приведенную на рис. 8.9;

- снимают показания времени включения (t_{THL}) и выключения (t_{TLH}) по экрану осциллографа 4.

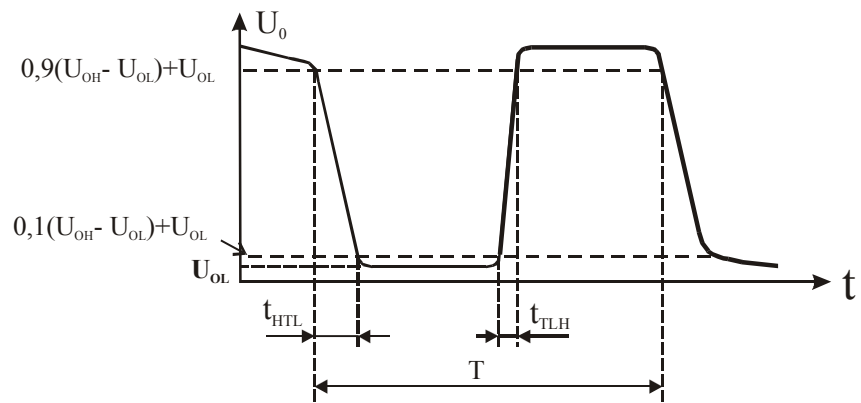


Рис. 8.9 Форма импульсного сигнала на выходе магнитоуправляемой ИС.

Список литературы к главе 8

1. Микросхемы интегральные К1116КП1. Технические условия. БКО.348.743-01 ТУ.
2. Микросхемы интегральные К1116КП2. Технические условия. БКО.348.743-02 ТУ.
3. Микросхемы интегральные К1116КП4. Технические условия. БКО.348.743-04 ТУ. Ред. II-85.

Заключение

Оценивая результаты и тенденции развития микромагнитоэлектроники можно сделать следующие выводы:

1. В последние годы на основе синтеза микроэлектроники и интегральных преобразователей магнитного поля возникло новое направление электронной техники – **микромагнитоэлектроника**.

Для реализации задач и целей микромагнитоэлектроники широко используется технологическая база микроэлектроники, современные схмотехнические решения, интегральные узлы и элементы, микроминиатюрные магнитные системы и др.

2. Зарубежными фирмами и отечественными предприятиями (до 1990 года) налажен серийный выпуск широкой номенклатуры изделий микромагнитоэлектроники.

Наибольшее распространение получили: дискретные и интегральные преобразователи магнитного поля, магнитоуправляемые и магниточувствительные интегральные схемы, магнитные датчики и функциональные магнитоэлектронные устройства.

Каждое из этих изделий имеет не только самостоятельное применение, но и может служить базой для создания современных магнитоэлектронных приборов и оборудования различного назначения.

3. Изделия микромагнитоэлектроники используются в системах управления производственными процессами, в автомобильной электронике, измерительной и вычислительной технике, дефектоскопии, медицинских и бытовых приборах и т.д. и т.п.

4. Оценка возможностей изделий микромагнитоэлектроники и их очевидных преимуществ перед другими группами изделий электронной техники, выполняющих сходные функции, показывает, что мы имеем дело с практически неосвоенным (особенно в России) направлением техники.

5. Развитие зарубежной микромагнитоэлектроники идет необычайно высокими темпами, для которых характерны: ежегодный рост номенклатуры и объема производства указанных изделий, привлечение новых производителей, неуклонное расширение сфер применения. Номенклатура производимых фирмами изделий микромагнитоэлектроники уже сегодня исчисляется многими сотнями типов.

Хотя сведений о суммарном объеме производства указанных изделий и не приводится, можно предположить, что речь может идти о миллиардах изделий в год.

6. Отечественная микромагнитоэлектроника также прошла свой определенный путь развития.

Были созданы научные основы для разработки изделий, создана технологическая база; с учетом специфики данного направления техники подготовлены инженерно-технические кадры: налажен, в значительных объемах, серийный выпуск нескольких типов кремниевых магнитоуправляемых микросхем и «монолитных» магниторезисторов, дискретных элементов Холла и отдельных типов магнитных датчиков.

Были выявлены тенденции и определены перспективы развития отечественной микромагнитоэлектроники, классифицированы параметры перспективных изделий и т.д.

Однако в настоящее время общий уровень развития отечественной микромагнитоэлектроники значительно уступает зарубежной и в темпах роста, и в расширении номенклатуры, и объемах выпускаемых изделий.

Отечественная микромагнитоэлектроника, пройдя достаточно большой путь в 1980-90 г.г., но сегодня она находится в стадии стагнации.

Налицо значительное сокращение объемов производства, разработанных магнитоуправляемых микросхем и датчиков; практически свернуты госбюджетные НИОКР по созданию принципиально новых изделий; разрушены коллективы разработчиков и технологов.

Резко сократился объем научно-технической информации между предприятиями; практически полностью отсутствует координация (на государственном уровне и по прямым связям) деятельности разработчиков, производителей и потребителей изделий микромагнитоэлектроники; не совершенствуется технология и нормативно-техническая база направления. Остаются невостребованными: научно-технический опыт, накопленный в России; производственные мощности микроэлектронных предприятий, высвободившиеся в результате конверсии; интеллектуальный потенциал российских специалистов-разработчиков магнитоэлектронных устройств.

Направление находится в жесточайшем кризисе и под угрозой его полного исчезновения.

В условиях децентрализации и монополизации производства, российские государственные структуры (департаменты и предприятия) оказались не в состоянии остановить эрозию перспективнейшего направления техники.

Следовательно, уже в настоящее время, необходимо принятие оперативных и эффективных мер по реновации и развитию микромагнитоэлектроники, но уже на иных организационных принципах.

7. В мировой практике выявились основные тенденции и определились перспективы дальнейшего развития микромагнитоэлектроники.

В последующее десятилетие усилия разработчиков и производителей магнитоэлектронных устройств и аппаратуры будут направлены на:

- дальнейшее повышение уровня магнитоэлектрических параметров и эксплуатационных характеристик изделий;
- повышение степени интеграции изделий с постепенным переходом на многоканальные устройства;
- расширение функций, выполняемых изделиями микромагнитоэлектроники, а также сфер их применения;
- дальнейшее уменьшение габаритных размеров, массы и материалоемкости, а также снижение энергопотребления и удельной себестоимости изделий.

Кроме того, можно ожидать более широкого использования в массовом производстве изделий микромагнитоэлектроники новых полупроводниковых материалов (арсенид галлия, антимонид индия и др.) и магнитотвердых материалов (сплавов типа «самарий-кобальт», «неодим-железо-бор» и др.), а также более совершенных технологических процессов: ионной имплантации, КМОП и КНИ технологий, молекулярной эпитаксии, плазменного осаждения магнитотвёрдых пленок и др.

8. Анализ тенденций и возможных перспектив развития разработок и производства магнитных датчиков показывает, что

- очень бурное развитие получают разработка и производство высокочувствительных магнитных датчиков и МЭУ для навигационных и медицинских приборов, а также для военной техники;
- будут продолжены работы по повышению уровня магнитоэлектрических параметров и улучшению эксплуатационных характеристик МД, в том числе и предельной рабочей температуры до 200 °С и более;
- по мере совершенствования технологии изготовления и конструкций магнитных датчиков сохранится тенденция к дальнейшему уменьшению их габаритных размеров, что приведет к снижению размеров и массы дорогостоящих постоянных магнитов;
- в ближайшее десятилетие можно ожидать значительного повышения степени интеграции элементов и расширения функций, выполняемых микроэлектронными магнитными датчиками;
- особое развитие получают разработка и производство магнитных интегральных полупроводниковых сенсоров (ИПС), в том числе и интеллектуальных;
- по мере совершенствования микроэлектронных магнитных датчиков сферы их применения будут неуклонно расширяться.

9. Можно уверенно предположить, что уже в ближайшие 3-5 лет будет освоен массовый выпуск магнитоэлектронных приборов индивидуального пользования, предназначенных для прогнозирования гелио- и геомагнитных возмущений. Причем потребность в таких приборах составит десятки миллионов изделий в год и более.

10. Судя по многочисленным публикациям в зарубежных и отечественных источниках, получит дальнейшее развитие разработка функциональных магнитоэлектронных устройств (ФЭМУ), которое будет идти по пути промышленной реализации новых идей, расширения номенклатуры, функций и сфер применения указанных устройств.

Подводя итоги, можно констатировать, что микромагнитоэлектроника является одним из перспективнейших направлений техники XXI века с огромными потенциальными возможностями в условиях рыночной экономики.

Даже перечисленные в настоящей работе многочисленные примеры составляют лишь ничтожную часть потенциального рынка изделий микромагнитоэлектроники, настолько, по нашему мнению широкого, что спрогнозировать сегодня многие будущие применения не предоставляется возможным

Основные параметры и характеристики наиболее известных типов изделий микромагнитоэлектроники, выпускаемых ведущими зарубежными производителями, приводятся во второй части настоящего издания.

Содержание

Предисловие	4
Глава 1. Микромагнитоэлектроника – новое направление техники	6
1.1. Производство изделий микромагнитоэлектроники	9
Список литературы к главе 1	15
Глава 2. Преобразователи магнитного поля	16
2.1. Элементы Холла	20
2.1.1. Элементы Холла по технологии биполярных ИС	24
2.1.2. Элементы Холла по МОП технологии	25
2.1.3. Элементы Холла по технологии молекулярной эпитаксии	26
2.1.4. Полевые элементы Холла	27
2.1.5. Производство и образцы элементов Холла	30
2.1.6. Частотные характеристики элементов Холла	32
2.1.7. Ориентационная характеристика элемента Холла	33
2.1.8. Применение элементов Холла	34
2.2. Магниторезисторы	42
2.2.1. «Монолитные» магниторезисторы	42
2.2.2. «Пленочные» магниторезисторы	46
2.2.3. Частотные характеристики магниторезисторов	50
2.2.4. Ориентационная характеристика магниторезистора	51
2.2.5. Применение магниторезисторов	52
2.3.1. Кремниевые магнитодиоды	60
2.3. Магнитодиоды	60
2.3.2. Полярные магнитодиоды	65
2.3.3. Магнитодиоды с эффектами переключения и «памяти»	66
2.3.4. Германиевые магнитодиоды	68
2.3.5. Применение магнитодиодов	68
2.4. Магнитотранзисторы	70
2.4.1. Биполярные магнитотранзисторы	70
2.4.3. Кремниевые двухколлекторные магнитотранзисторы	72
2.4.2. Германиевые двухколлекторные магнитотранзисторы	72
2.4.4. Кремниевые двухстоковые магнитотранзисторы	73
2.4.5. Биполярный горизонтальный МОП p-n-p транзистор	74
2.4.6. Полярный магнитотранзистор	74
2.4.7. Однопереходные магнитотранзисторы	75
2.4.8. Многоколлекторные и многостоковые магнитотранзисторы	76
2.4.9. Комбинированный преобразователь магнитного поля	77
2.4.10. Применение магнитотранзисторов	79
2.5. Магнитотиристоры	80
2.6. ГМР преобразователи	81
2.7. Полевые ГМР магнитотранзисторы	84
2.8. Преобразователь магнитного поля на доменоносителях	85
2.9. Магниточувствительные Z-элементы	87
2.10. Датчики Виганда	88
2.11. Феррозондовые ПМП	90
2.11.1. Магнитоиндуктивные датчики	92
2.12. Сравнительные характеристики и сферы применения ПМП	93

Список литературы к главе 2	106
Глава 3. Магниточувствительные и магнитоуправляемые ИС	110
3.1. Магниточувствительные интегральные схемы	112
3.1.1. Промышленные образцы магниточувствительных микросхем	114
3.1.2. Применение магниточувствительных ИС	121
3.2. Магнитоуправляемые интегральные схемы	125
3.2.1. Электрические схемы магнитоуправляемых ИС	129
3.2.2. Промышленные образцы отечественных МУМ	132
3.2.3. Промышленные образцы зарубежных МУМ	137
3.2.4. Применение магнитоуправляемых ИС	146
3.3. Совмещенные (магнитооптические) интегральные микросхемы	152
3.4. Перспективы и тенденции развития МЧМС и МУМ	155
Список литературы к главе 3	156
Глава 4. Многоэлементные и многоканальные преобразователи МП	158
Список литературы к главе 4	164
Глава 5. Микроэлектронные магнитные датчики	165
5.1. Магнитные датчики для регистрации перемещений	169
5.1.1. Магнитные датчики линейного перемещения	174
5.1.2. Магнитные датчики приближения	175
5.1.3. Координатоувствительные магнитные датчики	178
5.1.4. Промышленные образцы датчиков перемещения	179
5.2. Щелевые магнитные датчики	183
5.2.1. Примеры технической реализации щелевых магнитных датчиков	184
5.2.2. Промышленные образцы щелевых магнитных датчиков	188
5.2.3. Применение ЩМД в системах электронного зажигания	189
5.3. Магнитные датчики угла поворота	192
5.3.1. Аналоговые датчики угла поворота	192
5.3.2. Магнитодиодный преобразователь типа «угол-код»	197
5.4. Магнитные датчики скорости вращения	199
5.4.1. Датчики скорости вращения, основанные на счете зубьев ферромагнитных шестерен	199
5.4.2. Датчики скорости вращения, основанные на считывании магнитного поля полюсов многополюсных магнитов	207
5.4.3. Датчики скорости вращения, использующие вихревые токи	212
5.5. Магнитные датчики угла наклона	214
5.6. Магнитные датчики для считывания информации с магнитных носителей	216
5.7. Датчики измерения тока и напряжения	223
5.7.1. Общие принципы бесконтактного измерения тока	223
5.7.2. Схемотехника магнитных датчиков тока и напряжения	226
5.7.3. Примеры технической реализации датчиков тока	227
5.7.4. Промышленные образцы магнитных датчиков тока	234
5.8. Магнитные датчики в современных электродвигателях	238
5.8.1. Принцип работы бесколлекторного электродвигателя постоянного тока	239
5.8.2. Конструкции бесколлекторных электродвигателей постоянного тока	241
5.8.3. Интегральные датчики положения ротора	245
5.9. Схемы сопряжения магнитных датчиков с внешними цепями	248
5.10. Некоторые примеры применения ПМП и датчиков	253
5.10.2. Примеры использования МД в автомобильной технике и промышленном оборудовании	264
Список литературы к главе 5	268

Глава 6. Магнитоэлектронные устройства	270
6.1. Бесконтактные переключатели	270
6.2. Бесконтактные клавишные модули	273
6.3. Бесконтактные переменные резисторы	280
6.4. МЭУ для определения направления вектора магнитного поля	283
6.4.1. Принципы определения направления вектора магнитного поля Земли	284
6.4.2. Выбор преобразователя магнитного поля	285
6.4.3. Магнитные датчики на основе тонкопленочных магниторезисторов	287
6.4.4. Ориентационные датчики с применением магниторезисторов	290
6.4.5. Варианты устройств для определения вектора МП, реализованных с использованием принципа квазимодуляции	293
6.4.6. Промышленные образцы ориентационных МД, реализованных с использованием ИС серии НМС	300
6.4.7. Устройство для определения вектора МП с применением ЭХ	301
6.4.8. Устройства для определения вектора МП с использованием магнито-индуктивных датчиков	304
6.5. МЭУ в аппаратуре исследования и визуализации магнитного поля	308
6.5.1. Измерение параметров неоднородного магнитного поля	308
6.5.2. Получение топографии магнитного поля	311
6.6. МЭУ в аппаратуре для неразрушающего контроля изделий	314
6.6.1. МЭУ для неразрушающего контроля изделий	314
6.6.2. Промышленные образцы МЭУ для неразрушающего контроля	324
6.7. Магнитоэлектронные устройства в экологии и медицине	326
6.7.1. Влияние геомагнитных полей на окружающую среду	328
6.7.2. МЭУ для диагностики магнитных бурь	329
6.7.3. Полупромышленные образцы магнитометров, реализованные с использованием феррозондов	332
6.7.4. МЭУ в магнитотерапии	335
6.7.5. Портативные приборы для измерения индукции магнитного поля	337
Список литературы к главе 6	340
Глава 7. Основные элементы конструкции изделий микромагнитоэлектроники	343
7.1. Постоянные магниты	343
7.2. Концентраторы магнитного поля	348
7.3. Катушки смещения	350
7.4. Магнитопроводы	352
7.5. Магнитные и термомагнитные шунты	352
7.6. Магнитные экраны	353
7.7. Корпуса изделий микромагнитоэлектроники	353
7.8. Элементы связи	354
Список литературы к главе 7	354
Глава 8. Измерение основных параметров преобразователей магнитного поля	355
8.1. Измерение основных параметров элементов Холла	356
8.2. Измерение основных параметров магниторезисторов	357
8.2.1. Измерение параметров магниторезисторного моста	357
8.2.2. Измерение параметров единичного магниторезистора	358
8.3. Измерение параметров магнитодиодов	359
8.4. Измерение параметров магниточувствительных ИС	360
8.5. Измерение параметров магнитоуправляемых ИС	361
Список литературы к главе 8	363
Заключение	364

Алфавитный указатель

Б

Бесконтактный

клавишный модуль 273

переключатель 270

переменный резистор 280

Бесконтактный манипулятор 259

Биомагнитные поля 328

Г

Геомагнитное поле 283

Германиевый магнитодиод 68

ГМР-преобразователь 81

Головка

считывающая на эффекте Виганда 221

Головка воспроизводящая

индукционная 216

магнитоэлектронная 216

тонкопленочная 218

Д

Датчик 165

блокировки дверей 261

в автомобильной технике 264

в автомобильной технике перечень 267

входная величина 165

выходной сигнал 165

гистерезис 166

динамическая характеристика 167

дополнительные погрешности 166

зарубежная классификация 167

контроля

размеров 253

толщины ленты 253

координаточувствительный 178

малого расхода жидкости 258

наклона автомобильный 260

общие требования 167

ориентационный 290

основная погрешность 166

первичный преобразователь 167

перемещения

поршневой 260

положения ротора (ДПР) 238

полупроводниковый чувствительный элемент 167

порог чувствительности 166

предельного тока 225

разрешающая способность 308

скорости

ветра 258

статическая характеристика 165

схемы сопряжения 248

температуры 262

типа TMS-215 307

тока

цифровой 225

- точного поддержания уровня 262
- угла поворота 192
- угла поворота аналоговый 192
- уровня
 - жидкости 255
- фазовая характеристика 167
- частотная характеристика 167
- щелевой 183
- щелевой в системе зажигания 189
- щелевой многоканальный 187
- щелевой с большим зазором 185
- Датчик Виганда 88
- Датчик линейного перемещения 174
- Датчик перемещений 169
 - зарубежная классификация 169
 - особенности 169
- Датчик перемещения
 - с замкнутой магнитной системой 173
 - с разомкнутой магнитной системой 172
- Датчик положения ротора
 - интегральный 245
- Датчик приближения 175
- Датчик скорости вращения
 - многополюсных магнитов 207
 - шестерен 199
- Датчик тока
 - линейный 225
 - навесной 237
 - разъемный 237
- Датчик угла наклона
 - области применения 215
- Датчики скорости вращения 199
 - на вихревых токах 212
- датчики угла наклона 214
- Дефектоскоп ИНТРОС 324

И

- Измерение времени включения МУМ 362
- Измерение параметров
 - MR-моста 357
 - дифференциального магниторезистора 358
 - магнитодиода 359
 - магниторезистора 358
 - магнитоуправляемых ИС 361
 - магниточувствительных ИС 360
 - элементов Холла 356
- Индикаторы магнитных бурь (ИБМ) 332
- Интегральный полупроводниковый сенсор 13
- Интегральный полупроводниковый сенсор (ИПС) 168
- Интеллектуальный сенсор 168
- Интраскоп МИ-10 324
- Источники
 - переменного МП 335
 - постоянного МП 335

К

- Катушки смещения 350
- Квазимодуляция магнитного потока 293
- Кодовый магнитный замок 261
- Комбинированный преобразователь магнитного поля 77, 78

- Конструкция элемента Холла 22
 - бескорпусная 22
 - на подложке 23
 - с концентратором 23
 - корпусная 23
- Концентраторы МП 348
- Корпуса МЭУ 353
- Коэффициент нелинейности преобразования 16
- Кремниевый магнитодиод 60
 - пороговые характеристики 64
 - температурные характеристики 63
 - частотные характеристики 64

М

- Магнитная буря 327
- Магнитная система 7
- Магнитное поле Земли 283
- Магнитные аномалии 284
- Магнитные экраны 353
- Магнитные экраны
 - выбор материала 353
- Магнитный
 - замок зажигания 261
- Магнитный ИПС 168
- Магнитодиод 60
 - интегральный
 - МОП 62
 - на основе КНС 62
 - полярный 65
 - применение 68
 - с эффектами памяти и переключения 66
 - схема включения 69
- Магнитоиндуктивный датчик 92
- Магнитометр
 - HMR2300 300
 - Vector-2X 305
- Магнитопауза 326
- Магнитопровод 352
- Магниторезистор 42
 - гигантский (GMR) 49
 - монолитный 42
 - нагрузочная способность 52
 - ориентационная характеристика 51
 - пленочный 46
 - применение 52
 - схемы включения 53
 - частотные характеристики 50
- Магниторезисторные микросхемы 288
- Магнитосфера 326
- Магнитотерапия 335
- Магнитотиристор 80
 - сдвоенный 81
- Магнитотранзистор 70
 - горизонтальный МОП 74
 - двухколлекторный 71
 - германиевый 72
 - кремниевый 72
 - кремниевый
 - вертикальный 73
 - двухстоковый 73

- однопереходный 75
- полярный 74
- применение 79
- схема включения 79
- Магнитоуправляемая схема 125
 - биполярная 125
 - переходная характеристика 127
 - применение 146
 - схемы сопряжения 146
 - униполярная 125
- Магниточувствительная схема 112
 - классификация 114
 - применение 121
 - схемы сопряжения 121
 - чувствительность 113
- Магниточувствительный Z-элемент 87
- Магнитоэлектроника. 6
- Магнитоэлектронное устройство 7
 - многоканальное 9
 - простое 7
 - сложное 7
 - функциональное 9, 270
- Микромагнитоэлектроника 7
- Миллитесламетр МТ-1 337
- Минимальный порог чувствительности преобразователя 17
- Многоэлементные МЭУ
 - мгновенного действия 158
 - с накоплением сигнала 161
- Модуль компаса
 - Wayfinder-VR 305

Н

Нетепловые эффекты ВЧ излучения 329

П

- Полевой ГМР-магнитотранзистор 84
- Постоянный магнит 343
 - выбор материала 344
 - стабильность параметров 345
- Преимущества ИПС 168
- Преобразователь магнитного поля 16
 - линейный 158
 - матричный 158
 - на доменоносителях 85
- Преобразователь «угол-код» 197
- Принципы бесконтактного измерения тока 223
- Принципы определения вектора МПЗ 284
- Простейший компас 284
- простой ИПС 168

Р

Реле 165

С

- сенсор матричного типа 168
- Сложный ИПС 168
- Совмещенные микросхемы 152
 - аналоговые 152
 - цифровые 152
- Согласующий каскад 7

Стабилизатор режимов работы 7
Схема управления 7
Считыватели карточек Виганда 222

Т

Теорема подобия 348
Тепловое воздействие ВЧ излучения 329

У

Усилитель мощности 7
Устройство магнитоэлектронное 270

Ш

Шунт
 магнитный 352
 термомагнитный 352

Э

Электродвигатель бесколлекторный 238
 конструкция 241
 принцип работы 239
Электромагнитная экология 328
Электросмог 326
Элемент Холла 20
 вертикальный 24
 МОП 26
 горизонтальный 24
 МОП 25
 молекулярноэпитаксиальный 26
 ориентационная характеристика 33
 полевой на КНИ 27
 применение 34
 способы стабилизации параметров 34
 трехполюсный 25
 частотные характеристики 32
Электродвигатель бесколлекторный
 преимущества 238