

В. С. ПОПОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРЕНИЯ
И ПРИБОРЫ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

В. С. ПОПОВ
КАНДИДАТ ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ

ИЗДАНИЕ СЕДЬМОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ

*Допущено
Министерством высшего и среднего специального образования СССР
в качестве учебного пособия для учащихся техникумов*



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1963 ЛЕНИНГРАД

Книга является учебником в основном для энергетических и электромеханических техникумов. Она может служить пособием и для инженерно-технических работников.

В книге рассматриваются приборы и методы измерения тока, напряжения, сопротивления, индуктивности, емкости, мощности, энергии, сдвига фаз и частоты, магнитные измерения, измерения неэлектрических величин электрическими методами и телеизмерения.

Специальная глава посвящена лабораторным работам по электрическим измерениям и приборам.

Попов Виктор Степанович

Электротехнические измерения и приборы, изд. 7-е, переработанное, М.—Л., Госэнергоиздат, 1963, 544 с. с черт.

Редактор Ю. П. Щурова

Техн. редактор Л. М. Фридкин

Сдано в набор 6/VI 1963 г.

Подписано к печати 24/X 1963 г.

Т-13944

Бумага 84×108^{1/32}

27,88 п. л.

Уч.-изд. л. 29

Тираж 90 000 экз.

Цена 1 р. 12 к.

Зак. 1042

Набрано в типографии № 1 Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

Отпечатано в Первой Образцовой типографии имени А. А. Жданова
Московского городского совнархоза. Москва, Ж-54, Валовая, 28.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Электрические измерения играют весьма важную роль в науке и технике, так как без измерений невозможно изучать электрические явления, контролировать работу электроустановок и правильно вести производственные процессы.

Гигантское энергостроительство и развитие электропромышленности, все возрастающее производство электроэнергии, а также применение ее в новых областях промышленности, транспорта и сельского хозяйства требуют высокоразвитой измерительной техники. Она обеспечивает четкую, бесперебойную работу электроустановок и их рациональное использование, экономию энергии, топлива, сырья и рациональное ведение производственных процессов.

Производство измерений требует знаний методов измерений и свойств измерительных приборов, а следовательно, и их устройства, умения выбрать надлежащий метод измерения и подобрать соответствующую измерительную аппаратуру, умения собрать схему, произвести наблюдения и записи, обработать полученные данные и в случае надобности произвести поверку измерительных приборов.

В соответствии с этим курс электрических измерений состоит из двух частей: теоретической, дающей учащимся необходимые знания в области методов измерений и измерительных приборов, и части практической, проводимой обычно в лаборатории, где учащиеся приобретают необходимые навыки в производстве измерений и знакомятся с конструктивным выполнением измерительной и вспомогательной аппаратуры.

Настоящая книга является учебником для энергетических и электромеханических техникумов и имеет цель

ознакомить учащихся с главнейшими методами измерений и измерительными приборами отечественного производства, которые применяются в электротехнической практике, с их выбором, областью применения и проверкой.

Эта книга может служить также пособием для инженерно-технических работников, занятых в промышленности и соприкасающихся с вопросами электрических измерений.

Книга рассчитана на читателя, знакомого с основами электротехники, теорией переменных токов и элементами высшей математики.

В седьмом издании книги гл. 3—6, 8, 12, 13 и 16 написаны вновь. Остальные главы переработаны и дополнены.

Главы 4 и 5 написаны канд. техн. наук В. М. Агаповым при участии В. С. Попова.

Автор выражает глубокую благодарность проф. А. С. Касаткину за большую работу по рецензированию книги.

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр
Предисловие	3
Введение	11
Глава первая. Классификация методов измерений и погрешности измерений	14
1-1. Методы измерений	14
1-2. Основные понятия и определения, относящиеся к мерам и приборам	16
1-3. Погрешности измерения	20
Глава вторая. Меры электрических единиц	30
2-1. Мера электродвижущей силы	30
2-2. Меры электрического сопротивления	32
2-3. Меры индуктивности и взаимной индуктивности	41
2-4. Меры емкости	42
2-5. Единицы электрических величин	44
Глава третья. Общие сведения об электроизмерительных приборах	49
3-1. Классификация	49
3-2. Схема работы прибора непосредственной оценки	60
3-3. Вращающий и противодействующий моменты	62
3-4. Устанавливающий момент	64
3-5. Момент трения	65
3-6. Постоянная и чувствительность прибора	67
3-7. Отсчетное устройство	69
3-8. Успокоение	70
3-9. Погрешности приборов	72
3-10. Устойчивость к перегрузке	74
3-11. Мощность потерь	74
3-12. Прочность изоляции	76
Глава четвертая. Измерительные механизмы приборов	77
4-1. Магнитоэлектрическая система	77
4-2. Электромагнитная система	86
4-3. Электродинамическая система	92
4-4. Ферродинамическая система	98
4-5. Индукционная система	102
4-6. Электростатическая система	106
4-7. Тепловая система	109

Глава пятая. Приборы непосредственной оценки для измерения тока и напряжения	111
5-1. Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы	111
5-2. Гальванометры магнитоэлектрической системы	123
5-3. Амперметры и вольтметры выпрямительной системы	143
5-4. Амперметры и вольтметры термоэлектрической системы	149
5-5. Амперметры и вольтметры электромагнитной системы	155
5-6. Амперметры и вольтметры электродинамической и ферродинамической систем	158
5-7. Вольтметры электростатической системы	162
5-8. Электронные (ламповые) вольтметры	164
Глава шестая. Приборы сравнения для измерения тока и напряжения	173
6-1. Компенсационный метод измерения напряжения (э. д. с.)	173
6-2. Потенциометры постоянного тока	176
6-3. Работа с потенциометром постоянного тока и его применение	180
6-4. Автоматические потенциометры	184
6-5. Потенциометры переменного тока	185
6-6. Цифровые приборы	190
Глава седьмая. Измерительные трансформаторы	192
7-1. Назначение измерительных трансформаторов	192
7-2. Трансформаторы напряжения	193
7-3. Трансформаторы тока	201
7-4. Измерительные трансформаторы постоянного тока	215
Глава восьмая. Измерение тока и напряжения	218
8-1. Схема включения амперметра и вольтметра	218
8-2. Измерение постоянных токов и напряжений	220
8-3. Измерение переменных токов и напряжений промышленной частоты	221
8-4. Измерение токов и напряжений в цепях трехфазного тока	222
8-5. Измерение малых токов и напряжений	223
8-6. Измерение больших токов и высоких напряжений	226
8-7. Амперметры и вольтметры в цепях с несинусоидальными токами и напряжениями	228
8-8. Измерение токов и напряжений при повышенной и высокой частоте	233
Глава девятая. Измерение сопротивлений	238
А. Методы измерений и приборы непосредственной оценки. Косвенные методы измерений	238
9-1. Замечания, относящиеся к методам измерений сопротивлений	238
9-2. Особенности измерения малых и больших сопротивлений	240
9-3. Омметры	245

9-4. Измерение средних сопротивлений методом амперметра и вольтметра	251
9-5. Измерение больших сопротивлений методом гальванометра и вольтметра	253
9-6. Измерение средних и больших сопротивлений методом вольтметра	254
Б. Методы измерения и приборы сравнения	255
9-7. Измерение малых и средних сопротивлений методом сравнения с образцовым сопротивлением при последовательном соединении	255
9-8. Измерение средних сопротивлений методом сравнения с образцовым сопротивлением при параллельном соединении	256
9-9. Измерение средних и больших сопротивлений методом замещения	257
9-10. Измерение средних сопротивлений одинарным мостом	260
9-11. Измерение малых сопротивлений двойным мостом	265
В. Измерение сопротивления изоляции установок и определение места повреждения изоляции	269
9-12. Замечания, относящиеся к методам измерений сопротивления изоляции установок	269
9-13. Измерение сопротивления изоляции установки, не находящейся под рабочим напряжением	271
9-14. Измерение сопротивления изоляции установки, находящейся под рабочим напряжением	274
9-15. Замечания, относящиеся к определению места повреждения изоляции линии	278
9-16. Определение места повреждения изоляции методом петли	279
Г. Измерение сопротивления заземлений	281
9-17. Основные понятия и определения, относящиеся к заземлению	281
9-18. Измерение сопротивлений заземлений методом амперметра и вольтметра	286
9-19. Прибор для измерения сопротивлений заземлений типа М1103 (компенсационный метод измерения)	287
9-20. Прибор для измерения сопротивлений заземлений типа МС-08	289
9-21. Измерение потенциалов отдельных точек поверхности земли	291
Глава десятая. Измерение индуктивности, взаимной индуктивности и емкости	293
А. Методы измерений и приборы непосредственной оценки	293
10-1. Замечания, относящиеся к измерению индуктивности, взаимной индуктивности и емкости	293
10-2. Измерение индуктивности переменным током	294

10-3. Измерение взаимной индуктивности переменным током	296
10-4. Измерение емкости переменным током	298
10-5. Приборы непосредственной оценки для измерения емкости (фарадометры)	300
10-6. Измерение емкости баллистическим гальванометром	301
Б Методы измерений и приборы сравнения	302
10-7. Условия равновесия моста переменного тока	302
10-8. Измерение индуктивности мостом	305
10-9. Измерение взаимной индуктивности мостом	309
10-10. Измерение емкости мостом	311
Глава одиннадцатая. Измерение мощности	315
11-1. Измерение мощности в цепи постоянного тока амперметром и вольтметром	315
11-2. Электродинамический ваттметр в цепи постоянного тока	315
11-3. Электродинамический ваттметр в цепи переменного тока	318
11-4. Ферродинамический ваттметр	327
11-5. Измерение мощности в цепях переменного тока с применением измерительных трансформаторов	329
11-6. Измерение активной мощности в четырехпроводных цепях трехфазного тока	335
11-7. Измерение активной мощности в трехпроводных цепях трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз	338
11-8. Измерение активной мощности в трехпроводных цепях трехфазного тока методом двух ваттметров	343
11-9. Измерение реактивной мощности в цепях трехфазного тока	349
11-10. Измерение мощности в цепях трехфазного тока с применением измерительных трансформаторов	353
Глава двенадцатая. Измерение электрической энергии и количества электричества. Электрические счетчики	357
12-1. Общие понятия	357
12-2. Индукционный счетчик активной энергии однофазного тока	357
12-3. Измерение активной энергии в цепях трехфазного тока	367
12-4. Измерение реактивной энергии в цепях трехфазного тока	369
12-5. Электродинамический счетчик	374
12-6. Магнитоэлектрический счетчик (счетчики количества электричества)	375
Глава тринадцатая. Измерение коэффициента мощности и частоты переменного тока	376
13-1. Электродинамические и ферродинамические фазометры	376
13-2. Электромагнитный фазометр	380

13-3. Фазоуказатели	381
13-4. Электродинамические и ферродинамические частотомеры	381
13-5. Электромагнитный частотомер	384
13-6. Выпрямительный частотомер	385
13-7. Вибрационный частотомер	387
13-8. Измерение частоты мостом	388
Глава четырнадцатая. Самопишущие приборы	390
14-1. Назначение самопишущих приборов	390
14-2. Приборы с непрерывной записью	390
14-3. Приборы с точечной записью	395
14-4. Приборы для записи нормальных и аварийных режимов работы	396
14-5. Общие замечания	398
Глава пятнадцатая. Осциллографы	399
15-1. Назначение осциллографов	399
15-2. Электромеханические осциллографы с магнитоэлектрическим измерительным механизмом	400
15-3. Электронные осциллографы	407
Глава шестнадцатая. Магнитные измерения	417
16-1. Общие замечания	417
16-2. Измерение постоянного магнитного потока	418
16-3. Измерение магнитной индукции, напряженности магнитного поля и магнитного напряжения	422
16-4. Получение кривой намагничивания и петли гистерезисного цикла баллистическим методом	429
16-5. Феррометр	435
16-6. Получение магнитных характеристик с применением электронного осциллографа	439
16-7. Получение магнитных характеристик с применением моста переменного тока	440
16-8. Определение потерь в стали ваттметровым методом	442
16-9. Разделение потерь в стали	444
Глава семнадцатая. Измерение неэлектрических величин электрическими методами	446
17-1. Общие замечания	446
17-2. Преобразователи сопротивления	449
17-3. Электролитические преобразователи сопротивления	460
17-4. Индуктивные преобразователи	461
17-5. Емкостные преобразователи	463
17-6. Фотоэлектрические преобразователи	464
17-7. Ионизационные преобразователи	468
17-8. Индукционные преобразователи	469
17-9. Пьезоэлектрические преобразователи	470
17-10. Термоэлектрические преобразователи	471
Глава восемнадцатая. Телеизмерения (общие понятия)	472
18-1. Общие замечания	472
18-2. Классификация систем телеизмерений	473
18-3. Телеизмерительные системы интенсивности	473

18-4. Частотные и импульсные системы телеизмерений	475
18-5. Суммирование	478
Глава девятнадцатая. Лабораторные работы	478
А. Общие указания к выполнению лабораторных работ	478
Б. Составные элементы электрических цепей и допустимые условия их работы . .	481
В. Содержание лабораторных работ	487
19-1. Стрелочный гальванометр (работа 1)	487
19-2. Зеркальный гальванометр (работа 2)	490
19-3. Градуировка прибора магнитоэлектрической системы с термопреобразователем и выпрямителем (работа 3)	493
19-4. Указания, относящиеся к поверке амперметров, вольтметров и ваттметров	495
19-5. Поверка технического амперметра (работа 4) . . .	496
19-6. Поверка технического вольтметра (работа 5) . . .	497
19-7. Поверка технического ваттметра (работа 6)	498
19-8. Поверка образцового амперметра (работа 7)	501
19-9. Определение погрешностей измерительного трансформатора тока (работа 8)	502
19-10. Измерение сопротивлений одинарным мостом (работа 9)	507
19-11. Измерение сопротивлений двойным мостом (работа 10)	508
19-12. Измерение сопротивления изоляции (работа 11) .	508
19-13. Измерение сопротивления заземления (работа 12) .	509
19-14. Измерение индуктивности мостом переменного тока (работа 13)	510
19-15. Измерение емкости мостом переменного тока (работа 14)	511
19-16. Поверка и регулировка индукционного счетчика (работа 15)	511
19-17. Измерение мощности двухэлементным ваттметром (работа 16а)	514
19-17а. Измерение мощности двухэлементным ваттметром с трансформаторами тока (работа 16б)	515
19-18. Измерение мощности в высоковольтной цепи трехфазного тока (работа 17)	517
19-19. Включение счетчиков активной и реактивной энергии в цепь трехфазного тока (работа 18)	521
19-20. Определение потерь в стали (работа 19)	523
19-21. Электронный осциллограф (работа 20)	524
19-22. Электромеханический осциллограф (работа 21) . .	528
Приложение. Государственные стандарты по электроизмерительным приборам	537
Литература	538
Предметный указатель	540

ВВЕДЕНИЕ

Изучение электрических явлений, установление количественных соотношений между отдельными электрическими величинами требуют производства измерений и применения электроизмерительных приборов.

Если, с одной стороны, измерения приводят к новым знаниям и новым открытиям, то, с другой стороны, эти знания и открытия обеспечивают возможность дальнейшего развития самих измерений. История развития электрических измерений неразрывно связана с историей развития учения об электричестве, с историей развития электротехники.

Несмотря на значительные достижения многих русских ученых в области электрических измерений, в царской России почти полностью отсутствовало промышленное производство электроизмерительных приборов, а скромные потребности страны удовлетворялись продукцией иностранных фирм.

После свержения власти помещиков и капиталистов рабочий класс под руководством Коммунистической партии, взяв власть в свои руки, приступил к строительству социалистического общества. В. И. Ленин указал, что важнейшим условием победы социализма является электрификация страны. В 1920 г. он с предельной четкостью сформулировал значение электрификации: «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны».

В 1920—1921 гг., несмотря на хозяйственную разруху и гражданскую войну, был разработан и принят знаменитый Ленинский план электрификации страны — план ГОЭЛРО.

В процессе выполнения этого плана в нашей стране не только были построены крупнейшие электрические

станции, но и была создана электротехническая промышленность и, в частности, электроприборостроительная промышленность.

За годы довоенных пятилеток было организовано производство электроизмерительных приборов, была проведена подготовка кадров приборостроителей; в научно-исследовательских лабораториях и экспериментально-конструкторских бюро были разработаны теория электроизмерительных приборов и методы их расчета, новые типы отечественных приборов, новые поточные методы производства. Наконец, были построены крупнейшие заводы по производству электроизмерительных приборов.

В суровые годы Великой Отечественной войны электроприборостроительные предприятия с честью выполнили заказы для нужд фронта, освоили производство надежных и устойчивых для трудных условий эксплуатации приборов.

В послевоенный период приборостроительные заводы подверглись значительному расширению и реконструкции. Наряду с мощным развитием металлургии, энергетики, химии, радиотехнической промышленности всемерное развитие получила приборостроительная промышленность. В стране создано много новых, оснащенных по последнему слову техники заводов, производящих радиоизмерительные, электроизмерительные приборы, средства автоматизации, контроля и регулирования технологических процессов. Достигнуты значительные успехи в области создания серийных приборов высоких классов точности: осциллографов различного назначения, электронных автоматических показывающих, самопишущих потенциометров и мостов, высокочувствительных фотокомпенсационных приборов и гальванометрических усилителей.

Электрификация является мощным фактором строительства экономики коммунистического общества. Программа Коммунистической партии Советского Союза и решения исторического XXII съезда КПСС определяют главную экономическую задачу партии и советского народа — создание в течение двух десятилетий материально-технической базы коммунизма.

Постоянный рост и совершенствование науки и техники, механизация и автоматизация производственных

процессов выдвигают новые задачи перед электроизмерительной техникой и приборостроительной промышленностью.

Ведущим направлением в развитии приборостроения в СССР наряду с дальнейшим повышением точности и надежности действия средств получения передачи и переработки информации является унификация их, сокращение типов необходимых приборов, что обеспечит комплексную автоматизацию производства.

В 1960—1962 гг. созданы вибротряскопрочные и ударопрочные модели щитовых приборов повышенной климатической стойкости и высокой чувствительности; приборы с углом шкалы более 200° . Унифицированы габаритные размеры приборных корпусов на основе нового стандарта. Выпускаются многопредельные приборы постоянного и переменного тока класса 0,1 со световым указателем и двухрядной шкалой; осваивается производство новых универсальных приборов различного назначения.

Промышленностью освоены: прецизионные потенциометры постоянного тока класса 0,002, большая серия малогабаритных щитовых и переносных самопишущих амперметров, вольтметров, ваттметров, комплектные измерительные установки постоянного и переменного тока; приборы с цифровым отсчетом и автокомпенсационными схемами дискретного преобразования измеряемой величины, позволяющие автоматизировать технологические процессы, контроль и массовые измерения на заводах при высокой производительности труда.

Универсальность электрических измерений для контроля и определения любых физических величин определяет непрерывное расширение номенклатуры электроизмерительных приборов и устройств и непрерывное улучшение методов измерений.

Автор

Глава первая

КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

1-1. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерение есть процесс сравнения измеряемой величины с величиной того же рода, условно принятой за единицу. Результат измерения выражают числом, показывающим отношение измеряемой величины к единице измерения.

Вещественное воспроизведение единицы измерения, ее дробного или кратного значения называют *мерой*.

Устройство, служащее для сравнения измеряемой величины с единицей измерения или с мерой, называют *измерительным прибором*.

При измерении величины пользуются мерами и измерительными приборами и применяют различные способы или методы измерений.

Прямые методы измерений считают такие методы, при которых измеряемая величина непосредственно сравнивается с величиной того же рода.

Прямые методы делятся на методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Метод непосредственной оценки. Метод, при котором измеряемая величина непосредственно определяется по показанию измерительного прибора, градуированного в значениях измеряемой величины, например измерение тока — амперметром, мощности — ваттметром и т. д.

Метод сравнения. Метод, при котором измеряемая величина определяется путем непосредственного

сравнения с мерой данной величины; например, измерение напряжения путем сравнения его с э. д. с. нормального элемента.

К методам сравнения относятся:

- 1) нулевой метод;
- 2) дифференциальный метод;
- 3) метод замещения.

Нулевой метод. В этом случае действие на прибор измеряемой величины или величины, функционально с ней связанной, сводится к нулю встречным действием известной величины того же рода; например, измерение э. д. с. путем компенсации ее известным напряжением; измерение сопротивления при помощи моста.

Дифференциальный метод. При этом методе прибором определяется разность между измеряемой и известной величинами; например, дифференциальный метод определения потерь в стали.

Метод замещения. Метод, при котором замещение измеряемой величины известной величиной не вызывает изменения показания измерительного прибора; например, измерение сопротивлений методом замещения (см. гл. 9).

Косвенными методами измерений называются такие методы, при которых искомая величина не измеряется непосредственно, а вычисляется на основании измерений других величин и известных соотношений между измеренными величинами и искомой величиной. Например, измерение сопротивления проводника можно произвести, измеряя силу тока в проводнике амперметром, а напряжение на его зажимах — вольтметром. Зная соотношение между силой тока I , напряжением U и сопротивлением R_x , можно вычислить последнее по формуле

$$R_x = \frac{U}{I}.$$

В электротехнической практике наибольшее распространение получил прямой метод непосредственной оценки, как наиболее простой и требующий наименьшего времени для производства измерения, хотя и обеспечивающий невысокую точность измерений, не превышающую 0,2—10%.

Для более точных измерений до 0,001% пользуются нулевым и дифференциальным методами, требующими значительно большего времени для производства измерений, а также более сложной и дорогой аппаратуры.

1-2. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К МЕРАМ И ПРИБОРАМ

Меры и измерительные приборы делятся на образцовые и рабочие.

Образцовыми мерами и образцовыми измерительными приборами называются меры и приборы, предназначенные для воспроизведения и хранения единиц измерения и для поверки и градуировки всякого рода мер и измерительных приборов.

Рабочими мерами и рабочими измерительными приборами считаются все меры и приборы, кроме образцовых, предназначенные для практических целей измерения.

Образцовые меры делятся на : 1) эталоны — образцовые меры и образцовые измерительные приборы, служащие для целей воспроизведения и хранения единиц с наивысшей достижимой при данном состоянии измерительной техники точностью — метрологической точностью; 2) образцовые меры и образцовые измерительные приборы ограниченной точности — меры и приборы, имеющие установленную, меньшую, чем метрологическая, точность и служащие для практических работ по поверке и градуировке всякого рода мер и измерительных приборов.

Рабочие меры и рабочие измерительные приборы делятся на лабораторные и технические.

Лабораторными мерами и лабораторными измерительными приборами называются меры и приборы, при применении которых необходим учет поправок для их значений и показаний, а также учет влияний различных факторов, например температуры, магнитных полей и т. д.

Техническими мерами и техническими измерительными приборами называются меры и приборы,

при применении которых принимается определенная, наперед установленная ограниченная точность измерения.

В дальнейшем мы будем говорить исключительно о мерах ограниченной точности и рабочих мерах.

Номинальное значение меры — значение, указанное на мере.

Действительное значение меры — значение меры, определяемое образцовыми мерами или образцовыми измерительными приборами.

Абсолютная погрешность меры ΔA — это разность между номинальным значением A_n и действительным значением A меры:

$$\Delta A = A_n - A. \quad (1-1)$$

Абсолютной поправкой меры δA называется разность между действительным и номинальным значениями меры:

$$\delta A = A - A_n. \quad (1-2)$$

Поправка равна погрешности, взятой с обратным знаком:

$$\delta A = -\Delta A.$$

Из уравнения (1-2) следует, что

$$A = A_n + \delta A, \quad (1-3)$$

т. е. для получения действительного значения меры необходимо поправку алгебраически прибавить к номинальному значению меры.

Показание измерительного прибора — значение измеряемой величины, которое устанавливается по прибору.

Действительное значение измеряемой величины — значение, определяемое образцовыми мерами или образцовыми измерительными приборами.

Следует иметь в виду, что действительное значение не есть истинное значение.

Абсолютной погрешностью прибора называется разность между показаниями прибора и действительным значением измеряемой величины.

Обозначив через A_1 — показание измерительного прибора, A — действительное значение измеряемой величины и ΔA — абсолютную погрешность прибора, можно написать:

$$\Delta A = A_1 - A. \quad (1-4)$$

Поправка прибора δA — это разность между действительным значением измеряемой величины и показанием прибора, т. е.

$$\delta A = A - A_1. \quad (1-5)$$

Поправка равна погрешности, взятой с обратным знаком:

$$\delta A = -\Delta A.$$

Из уравнения (1-5) следует, что

$$A = A_1 + \delta A, \quad (1-6)$$

т. е. для получения действительного значения измеряемой величины необходимо поправку алгебраически прибавить к показанию прибора.

Пример 1-1. Показание амперметра $I_1 = 20$ а.
Показание образцового амперметра $I = 20,4$ а.
Погрешность амперметра.

$$\Delta I_1 = I_1 - I = 20 - 20,4 = -0,4 \text{ а.}$$

Поправка амперметра

$$\delta I_1 = -\Delta I_1 = I - I_1 = 20,4 - 20 = 0,4 \text{ а.}$$

Действительное значение измеряемой амперметром величины тока

$$I = I_1 + \delta I_1 = 20 + 0,4 = 20,4 \text{ а.}$$

Для некоторых приборов вместо поправок дают поправочный множитель. Поправочный множитель — число, на которое надо умножить показание прибора для того, чтобы получить действительное значение измеряемой величины.

Относительной погрешностью измерительного прибора называется выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} 100\% = \frac{A_1 - A}{A} 100\%. \quad (1-7)$$

Она приближенно равна отношению абсолютной погрешности к показанию прибора

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A} 100\% \approx \frac{\Delta A}{A_1} 100\%.$$

Приведенной погрешностью измерительного прибора считают выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности к верхнему пределу измерения прибора

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_n} 100\%. \quad (1-8)$$

Для приборов с двусторонней шкалой, имеющей нуль посередине шкалы, приведенная погрешность находится как отношение абсолютной погрешности к сумме абсолютных номинальных значений прибора

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{|+A_n| + |-A_n|} 100\%.$$

Для приборов, имеющих шкалу с начальным значением $A_{нач}$, не равным нулю, и номинальным значением A_n , приведенная погрешность определяется по формуле

$$\gamma_n = \frac{\Delta A}{A_n - A_{нач}} 100\%.$$

Для приборов, имеющих резко неравномерную шкалу, например для омметров, фазометров, приведенная погрешность выражается в процентах от длины шкалы.

Пример 1-2. Показание амперметра $I_1 = 20$ а.

Верхний предел измерения амперметра или, что то же, номинальный ток амперметра $I_n = 50$ а.

Показание образцового амперметра $I = 20,5$ а.

Относительная погрешность измерения

$$\gamma_{I_1} = \frac{I_1 - I}{I} 100\% = \frac{20 - 20,5}{20,5} 100\% \approx -2,5\%.$$

Приведенная погрешность амперметра

$$\gamma_n = \frac{I_1 - I}{I_n} 100\% = \frac{20 - 20,5}{50} 100\% = -1\%.$$

Основной погрешностью прибора называется погрешность, которую прибор имеет при нормаль-

ных условиях работы, т. е. при нормальном положении, температуре окружающей среды $20 \pm 5^\circ \text{C}$, отсутствии внешнего электрического и магнитного полей, кроме земного, частоте 50 *гц*, синусоидальной форме кривой.

Дополнительная погрешность прибора — погрешность, вызванная отклонением условий работы прибора от его нормальных условий. Различают дополнительные погрешности от неправильной установки, температуры, внешних магнитных и электрических полей, частоты и т. д.

Допустимой погрешностью измерительного прибора называется наибольшая приведенная относительная погрешность, которую может иметь прибор согласно ГОСТ, инструкциям или правилам:

$$\gamma_d = \frac{\Delta A_{\text{наиб}}}{A_n} 100\% \quad (1-9)$$

Точность измерительного прибора есть степень достоверности его показаний. Она оценивается допустимой погрешностью прибора.

Вариацией показаний измерительного прибора называется наибольшая полученная экспериментально разность между отдельными повторными показаниями прибора, соответствующими одному и тому же действительному значению измеряемой величины, при неизменных внешних условиях, а постоянством измерительного прибора — степень устойчивости показания его в одних и тех же условиях одной и той же величины. Постоянство прибора характеризуется его вариацией.

Поверка измерительного прибора — это процесс определения погрешности прибора.

1-3. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

Каким бы методом мы ни измеряли величину, как бы тщательно мы ни производили измерения, мы никогда не можем получить точное значение ее из-за неточности измерительных приборов, несовершенства методов измерений, несовершенства наших органов чувств и, наконец, из-за всяких случайных влияний на результат измерения. Поэтому при всяком измерении мы должны определить как числовое значение измеряемой величины, так и точность его.

Абсолютной погрешностью измерения называется разность между найденными значениями измеряемой величины и ее действительным значением.

Относительной погрешностью измерения называется выраженное в процентах отношение абсолютной погрешности измерения к действительному значению измеряемой величины.

Пример 1-3. При измерении сопротивления было найдено его значение $r_1 = 202$ ом. Действительная величина сопротивления $r = 200$ ом.

Абсолютная погрешность измерения

$$\Delta r = r_1 - r = 202 - 200 = 2 \text{ ом.}$$

Относительная погрешность

$$\gamma_r = \frac{\Delta r}{r} 100\% = \frac{2}{200} 100\% = 1\%.$$

Погрешности измерений делятся на три класса:

- 1) систематические погрешности;
- 2) случайные погрешности;
- 3) промахи.

Под систематическими погрешностями понимают такие, которые при повторных измерениях данной величины остаются неизменными или изменяются по определенному закону. Эти погрешности могут быть изучены, определены и, следовательно, влияние их на результат измерений может быть устранено введением соответствующих поправок. К систематическим погрешностям относятся погрешности:

- 1) инструментальные, обусловленные несовершенством измерительных приборов или их неисправностью;
- 2) установки, происходящие от неправильной установки измерительной аппаратуры;
- 3) методические или теоретические, происходящие от несовершенства методов измерения;
- 4) личные, зависящие от личных свойств экспериментатора.

Пример 1-4. Если мы несколько раз измерим длину проводника метром, а затем при проверке самого метра обнаружим, что длина его меньше действительной на некоторую величину, то, очевидно, из-за неточности метра мы при каждом измерении получали погрешность, постоянную по величине и знаку, — погрешность систематическую.

Пример 1-5. Если мы несколько раз измерим э. д. с. элемента вольтметром, стрелка которого несколько погнута, то, очевидно, из-за этого мы при каждом измерении получим погрешность, постоянную по величине и знаку, — погрешность систематическую.

Пример 1-6. Если мы будем производить измерение силы тока амперметром, деления шкалы которого нанесены неточно, то, очевидно, каждый раз при измерении этого тока мы получим постоянную по величине и знаку погрешность — погрешность систематическую.

Пример 1-7. Производя несколько раз измерение сопротивления r_x при помощи амперметра и вольтметра (рис. 1-1), мы во всех

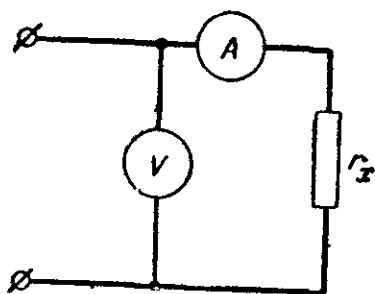


Рис. 1-1. Схема измерения сопротивления амперметром и вольтметром.

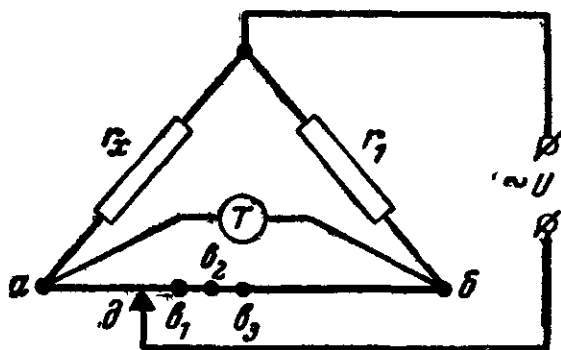


Рис. 1-2. Схема реохордного моста.

случаях определения r_x получим погрешность (систематическую), обусловленную тем, что вольтметр измерял напряжение не только на сопротивлении r_x , но и на амперметре. Следовательно, показания вольтметра каждый раз были увеличены на одну и ту же величину.

Пример 1-8. Допустим, что измеряется сопротивление жидкого проводника при помощи моста с телефоном (рис. 1-2). Величина сопротивления r_x определяется по положению движка δ , соответствующему исчезновению звука в телефоне. Положение движка находится перемещением его от точки a к точке b . Если экспериментатор обладает слаборазвитым слухом, то он заметит исчезновение звука, скажем, при положении движка в точке δ_1 , не доведя его до того положения δ_2 , при котором звук действительно исчезает. При повторном измерении погрешность повторится с сохранением знака и величины. Следовательно, это погрешность систематическая, обусловленная личными свойствами экспериментатора. Указанию погрешности можно устранить, отыскав положение движка δ_3 , соответствующее исчезновению звука, перемещая движок от точки b к точке a и взяв среднюю арифметическую величину из полученных значений.

Под случайными погрешностями понимают переменные по величине и знаку погрешности, изменение которых не подчиняется какой-либо известной закономерности. Эти погрешности происходят от влия-

ния на результат измерения причин случайного характера.

Под промахами понимают погрешности, грубо искажающие результат измерения, например неправильный отсчет по шкале прибора, неправильная запись наблюдения и т. д. Наблюдения, содержащие промахи, следует отбрасывать, как явно недостоверные.

а) Определение погрешности отдельного измерения при прямом методе непосредственной оценки.

Рассмотрим, как вычисляется погрешность отдельного измерения, когда измеряемая величина определяется непосредственно по показанию прибора. На шкалах измерительных приборов указывается класс точности прибора (см. § 3-1). Цифра, указывающая класс точности, обозначает основную допустимую приведенную погрешность прибора:

$$\gamma_d = \frac{\Delta A_{\text{наиб}}}{A_n} 100\%,$$

где $\Delta A_{\text{наиб}}$ — наибольшая абсолютная погрешность прибора;

A_n — номинальная величина прибора, т. е. верхний предел измерения его.

Из написанного следует, что наибольшая абсолютная погрешность, которую может иметь прибор в любой точке шкалы, а следовательно, и наибольшая возможная абсолютная погрешность $\Delta A_{\text{н.в}}$ при измерении какой-либо величины этим прибором могут быть выражены так:

$$\Delta A_{\text{наиб}} = \Delta A_{\text{н.в}} = \pm \frac{\gamma_d A_n}{100\%}.$$

Выражая в процентах отношение наибольшей возможной абсолютной погрешности к найденному (или действительному) значению измеряемой величины, получаем наибольшую возможную относительную погрешность измерения

$$\gamma_{\text{н.в}} = \frac{\Delta A_{\text{н.в}}}{A} 100\% = \frac{\gamma_d A_n}{100\%} \cdot \frac{100\%}{A} = \pm \gamma_d \frac{A_n}{A}. \quad (1-10)$$

Таким образом, для нахождения наибольшей возможной относительной погрешности при измерении величин

ны непосредственно по показанию прибора необходимо основную допустимую приведенную погрешность прибора умножить на отношение номинальной величины прибора к найденному значению измеренной величины.

Пример 1-9. Определить погрешность при измерении тока амперметром с номинальным током $I_n = 30$ а класса точности 1,5, если показания амперметра $I_1 = 10$ а.

Погрешность (наибольшая возможная при измерении тока)

$$\gamma_{I_1 \text{ (н.в)}} = \gamma_d \frac{I_n}{I_1} = \pm 1,5 \frac{30}{10} = \pm 4,5\%.$$

Таким образом, найденное значение тока $I_1 = 10$ а может отличаться от действительного значения этого тока не более чем на $\pm 4,5\%$ найденного значения.

б) Определение погрешности отдельного измерения при косвенных методах измерения.

При косвенных методах измерения, когда измеряемая величина определяется подсчетом, наибольшая возможная погрешность измерения определяется следующим образом. Положим, что искомая величина A определяется выражением

$$A = B^n C^m D^p, \quad (1-11)$$

где B , C и D — величины, полученные в результате прямых измерений;

n , m и p — показатели степени при B , C и D , которые могут быть целыми и дробными, положительными и отрицательными.

Возьмем логарифмы правой и левой частей уравнения (1-11):

$$\ln A = n \ln B + m \ln C + p \ln D.$$

Продифференцировав полученное уравнение, найдем:

$$\frac{dA}{A} = n \frac{dB}{B} + m \frac{dC}{C} + p \frac{dD}{D}.$$

Заменяя дифференциалы dA , dB , dC и dD малыми приращениями ΔA , ΔB , ΔC и ΔD (которые можно рассматривать как абсолютные погрешности), можно написать:

$$\frac{\Delta A}{A} = n \frac{\Delta B}{B} + m \frac{\Delta C}{C} + p \frac{\Delta D}{D}$$

или

$$\gamma_A = n\gamma_B + m\gamma_C + p\gamma_D, \quad (1-12)$$

где $\gamma_A = \frac{\Delta A}{A}$ — относительная погрешность при определении величины A ;

$$\gamma_B = \frac{\Delta B}{B}; \quad \gamma_C = \frac{\Delta C}{C}; \quad \gamma_D = \frac{\Delta D}{D}$$

— относительные погрешности величин B , C и D .

Уравнение (1-12) дает возможность, зная погрешности отдельных величин, определить наибольшую возможную относительную погрешность искомой величины A . Так как погрешности могут быть и положительными и отрицательными, то при нахождении наибольшей возможной погрешности следует всегда брать наиболее неблагоприятный случай, т. е. относительные погрешности в предыдущем выражении следует всегда брать со знаком плюс.

Пример 1-10. Для измерения энергии, которая затрачивается в проводнике, были измерены: напряжение U с погрешностью $\gamma_U = \pm 1\%$, сопротивление проводника r с погрешностью $\gamma_r = \pm 0,5\%$ и время t с погрешностью $\gamma_t = \pm 1,5\%$.

Вычислим наибольшую возможную погрешность при измерении энергии W .

Воспользуемся формулой энергии

$$W = \frac{U^2 t}{r} = U^2 r^{-1} t.$$

Относительная погрешность при изменении W равна:

$$\gamma_W = 2\gamma_U + \gamma_r + \gamma_t = 2 \cdot 1 + 0,5 + 1,5 = \pm 4\%.$$

Формула для определения наибольшей возможной относительной погрешности дает также возможность решить вопрос, с какой степенью точности следует производить измерения отдельных величин, если требуется получить искомую величину с заранее заданной степенью точности.

Рассмотрим, чему будет равна наибольшая возможная относительная погрешность искомой величины, если эта величина равна сумме нескольких измеренных величин.

Обозначим: A — искомая величина; ΔA — наибольшая возможная абсолютная погрешность; B и C — вели-

чины, полученные в результате прямых измерений; ΔB и ΔC — погрешности при измерении величин B и C .

Теперь можно написать:

$$A + \Delta A = (B + \Delta B) + (C + \Delta C).$$

Вычитая из этого уравнения почленно другое ($A = B + C$), получаем:

$$\Delta A = \Delta B + \Delta C,$$

откуда

$$\gamma_A = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B + \Delta C}{B + C}. \quad (1-13)$$

Если искомая величина равна разности двух или нескольких измеренных величин, то наибольшую возможную относительную погрешность получим аналогичным образом. Придерживаясь тех же обозначений, можно написать:

$$A + \Delta A = (B + \Delta B) - (C - \Delta C).$$

Вычитая из этого уравнения почленно другое ($A = B - C$), получаем:

$$A + \Delta A - A = B + \Delta B - C + \Delta C - B + C$$

или

$$\Delta A = \Delta B + \Delta C,$$

откуда

$$\gamma_A = \frac{\Delta A}{A} = \frac{\Delta B + \Delta C}{B - C}. \quad (1-14)$$

Из уравнения (1-14) следует, что наибольшая возможная относительная погрешность искомой величины равна сумме абсолютных погрешностей измеренных величин, деленной на разность этих величин. В этом случае наибольшая возможная относительная погрешность искомой величины может быть весьма значительной, поэтому таких методов измерения следует по возможности избегать. Поясним сказанное примером.

Пример 1-11. Вычислим наибольшую возможную относительную погрешность при измерении тока во второй параллельной ветви (рис. 1-3), если измеряется ток в первой параллельной ветви и неразветвленной части цепи.

Амперметр в первой параллельной ветви показал $I_1 = 20$ а; относительная погрешность $\gamma_{I_1} = \pm 2\%$, абсолютная погрешность $\Delta I_1 =$

$\pm 0,4$ а Амперметр в неразветвленной части цепи показал $I = 30$ а; относительная погрешность $\gamma_I = \pm 2\%$, абсолютная погрешность $\Delta I = \pm 0,6$ а. Ток во второй параллельной ветви

$$I_2 = I - I_1 = 30 - 20 = 10 \text{ а.}$$

В наиболее неблагоприятном случае γ_{I_1} имеет отрицательное значение. Абсолютная погрешность при измерении тока I_2

$$\begin{aligned} \Delta I_2 &= +\Delta I - (-\Delta I_1) = \Delta I + \\ &+ \Delta I_1 = 0,6 + 0,4 = 1 \text{ а.} \end{aligned}$$

Наибольшая возможная относительная погрешность при измерении тока во второй параллельной ветви

$$\gamma_{I_2} = \frac{\Delta I_2}{I_2} 100\% = \pm \frac{1 \text{ а}}{10 \text{ а}} 100\% = \pm 10\%.$$

К рассмотренным случаям определения наибольшей возможной погрешности можно свести большинство более сложных случаев определения погрешности.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТИ РЯДА ИЗМЕРЕНИЙ

Ранее отмечалось, что под случайными погрешностями понимают такие переменные погрешности, изменение которых не подчиняется какой-либо закономерности. Они происходят главным образом от влияния окружающей среды на результат измерения. Наличие случайных погрешностей обнаруживается тем, что при повторных измерениях одной и той же величины получаются результаты, разнящиеся друг от друга.

Для уменьшения влияния случайных погрешностей на результат измерения рекомендуется производить измерение данной величины в одинаковых условиях и по возможности большее число раз и из полученных значений брать среднее арифметическое, которое считается наиболее вероятным значением измеренной величины, так как случайные погрешности, одинаковые по абсолютной величине, но разные по знакам, при большом числе измерений встречаются одинаково часто.

Допустим, для определения величины, действительное значение которой A , произведено n измерений. Най-

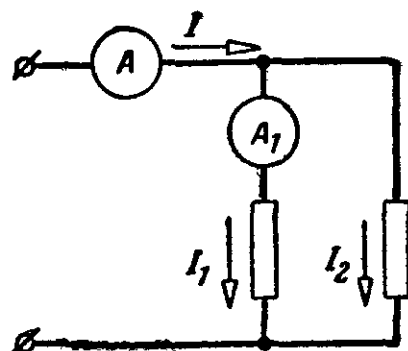


Рис 1-3. Электрическая цепь с двумя параллельными ветвями.

денные значения обозначим: $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$. Наиболее вероятное значение

$$A_0 = \frac{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n}{n}. \quad (1-15)$$

Точность вероятного значения характеризуется абсолютной вероятной погрешностью $\Delta A_{0в}$ или относительной вероятной погрешностью $\gamma_{0в}$.

Абсолютная вероятная погрешность определяется по формуле ¹

$$\Delta A_{0в} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(\Delta A_1)^2 + (\Delta A_2)^2 + \dots + (\Delta A_n)^2}{n(n-1)}}, \quad (1-16)$$

где $\Delta A_1 = A_1 - A_0$; $\Delta A_2 = A_2 - A_0$; $\Delta A_n = A_n - A_0$ — остаточные погрешности отдельных измерений.

Относительная вероятная погрешность

$$\gamma_{0в} = \frac{\Delta A_{0в}}{A_0} 100\%.$$

Вероятной погрешностью называется такая погрешность, относительно которой можно сказать, что из числа случайных погрешностей, которые будут иметь место при повторных измерениях данной величины, половина погрешностей по абсолютной величине будет меньше вероятной погрешности, а половина — больше ее.

Погрешность

$$\Delta A_{0пр} = 4,5 \Delta A_{0в} \quad (1-17)$$

носит название предельной погрешности результата измерения.

Результат измерения можно записать в следующем виде:

$$A = A_0 \pm \Delta A_{0в}. \quad (1-18)$$

Эта запись обозначает, что мы, принимая за наиболее вероятное значение измеряемой величины значение A_0 , допускаем, что при этом одинаково возможны погрешности как меньше $\Delta A_{0в}$, так и больше $\Delta A_{0в}$, но во всяком случае не превышающие $\Delta A_{0пр} = 4,5 \Delta A_{0в}$.

¹ Формулы для погрешностей $\Delta A_{0в}$ и $\Delta A_{0пр}$ даются без выводов вследствие их сложности. Интересующихся можно отослать к книге проф. М. Ф. Маликова «Основы метрологии» (Стандартиздат, 1949).

Иллюстрируем сказанное примером.

Пример 1-12. Искомое сопротивление было измерено 8 раз; при этом получены результаты:

$$\begin{aligned}r_1 &= 116,2 \text{ ом}, & r_5 &= 118,2 \text{ ом}; \\r_2 &= 118,2 \text{ ом}; & r_6 &= 118,4 \text{ ом}; \\r_3 &= 118,5 \text{ ом}; & r_7 &= 117,8 \text{ ом}; \\r_4 &= 117,0 \text{ ом}, & r_8 &= 118,1 \text{ ом}.\end{aligned}$$

Наиболее вероятное значение искомого сопротивления

$$\begin{aligned}r_0 &= \frac{r_1 + r_2 + r_3 + \dots + r_8}{8} \\&= \frac{116,2 + 118,2 + 118,5 + 117,0 + 118,2 + 118,4 + 117,8 + 118,1}{8} = \\&= 117,8.\end{aligned}$$

Остаточные погрешности отдельных измерений:

$$\begin{aligned}\Delta r_1 &= r_1 - r_0 = -1,6 \text{ ом}; & \Delta r_5 &= r_5 - r_0 = +0,4 \text{ ом}; \\ \Delta r_2 &= r_2 - r_0 = +0,4 \text{ ом}; & \Delta r_6 &= r_6 - r_0 = +0,6 \text{ ом}; \\ \Delta r_3 &= r_3 - r_0 = +0,7 \text{ ом}; & \Delta r_7 &= r_7 - r_0 = 0,0 \text{ ом}; \\ \Delta r_4 &= r_4 - r_0 = -0,8 \text{ ом}; & \Delta r_8 &= r_8 - r_0 = +0,3 \text{ ом}.\end{aligned}$$

Абсолютная вероятная погрешность результата измерения

$$\begin{aligned}\Delta r_{\text{ов}} &= \frac{2}{3} \sqrt{\frac{(\Delta r_1)^2 + (\Delta r_2)^2 + \dots + (\Delta r_8)^2}{8(8-1)}} = \frac{2}{3} \times \\ &\times \sqrt{\frac{(-1,6)^2 + (+0,4)^2 + (+0,7)^2 + (-0,8)^2 + (+0,4)^2 + (+0,6)^2 + (0,0)^2 + (+0,3)^2}{8 \cdot 7}} = \\ &= \frac{2}{3} 0,282 = 0,19 \text{ ом}.\end{aligned}$$

Относительная вероятная погрешность

$$\gamma_{r_{\text{ов}}} = \frac{\Delta r_{\text{ов}}}{r_0} 100\% = \frac{0,19}{117,8} 100\% = 0,16\%.$$

Предельная погрешность

$$\Delta r_{\text{опр}} = 4,5 \Delta r_{\text{ов}} = 4,5 \cdot 0,19 = 0,85 \text{ ом}$$

или

$$\gamma_{r_{\text{опр}}} = 4,5 \gamma_{r_{\text{ов}}} = 4,5 \cdot 0,16 = 0,72\%.$$

Запишем окончательный результат измерения:

$$r = r_0 \pm \Delta r_{\text{ов}} = 117,8 \pm 0,19 \text{ ом}$$

или

$$r = 117,8 \text{ ом} \pm 0,16\%.$$

Из написанного следует:

- 1) наиболее вероятное значение измеренной величины равно 117,8 ом;
- 2) в данных условиях измерения мы одинаково часто будем делать погрешности как больше, так и меньше 0,19 ом;
- 3) наибольшая погрешность, которую мы делаем в данных условиях, едва ли будет больше 0,85 ом.

Иногда стремятся производить измерения наиболее точными приборами, не считаясь с условиями работы, от которых зависят случайные погрешности измерений.

Необходимо иметь в виду, что применять измерительные приборы высокой точности имеет смысл только тогда, когда относительная вероятная погрешность измерения, учитывающая влияние окружающей обстановки на точность измерения, будет меньше относительной наибольшей возможной погрешности измерения.

Глава вторая

МЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЕДИНИЦ

2-1. МЕРА ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ

Образцовой мерой э. д. с. является нормальный международный кадмиевый элемент. Он представляет собой гальванический элемент, изготавливаемый согласно определенной спецификации. Его э. д. с. при постоянной температуре устойчива и известна с высокой точностью. При изменении температуры элемента его э. д. с. изменяется по известному закону, что дает возможность определить ее при различных значениях температуры.

Элемент (рис. 2-1) состоит из запаянного стеклянного сосуда Н-образной формы. Положительным электродом (А) служит чистая ртуть, заполняющая нижнюю часть одной ветви сосуда. Отрицательным электродом (Б) служит амальгама кадмия (Cd—12%; Hg—88%), заполняющая нижнюю часть второй ветви сосуда. Выводы от электродов выполнены платиновыми проволочками, впаянными в нижние части ветвей Н-образного сосуда. Над положительным электродом

расположена паста — деполяризатор (В). Она состоит из смеси размельченных кристаллов сернокислого кадмия — $\text{CdSO}_4 + \frac{8}{3}\text{H}_2\text{O}$ и сернокислой закиси ртути — Hg_2SO_4 . Непосредственно над пастой и отрицательным электродом расположены кристаллы сернокислого кадмия (Г). Поверх кристаллов налит электролит (Д) — насыщенный водный раствор сернокислого кадмия.

Три сужения-перетяжки в нижней части сосуда препятствуют перемешиванию составных частей элемента при сотрясениях. Нормальные элементы заключаются в металлические, пластмассовые или деревянные кожухи.

Постоянство э. д. с. элемента и незначительная зависимость ее от температуры являются важными положительными свойствами кадмиевого элемента.

Электродвижущая сила элемента может быть выражена в первом приближении уравнением

$$E_t = [E_{20} - 0,0000406 (t - 20)], \text{ в}, \quad (2-1)$$

где E_t — э. д. с. при температуре $t^\circ \text{C}$;

E_{20} — э. д. с. при температуре 20°C .

Нормальные элементы по степени точности делятся на три класса (ГОСТ 1954-55).

Значение э. д. с. элемента второго класса при температуре 20°C должно изменяться от 1,0185 до 1,0187 в с точностью до $\pm 100 \text{ мкв}$. Допустимое изменение э. д. с. этого элемента за год не должно превышать 100 мкв .

Элемент имеет внутреннее сопротивление от 500 до $1\,000 \text{ ом}$.

Значение тока, проходящего через элемент, не должно превышать 1 мка , в противном случае может произойти изменение его э. д. с.

Во избежание изменения э. д. с. не следует допускать неодинакового нагрева или охлаждения ветвей элемен-

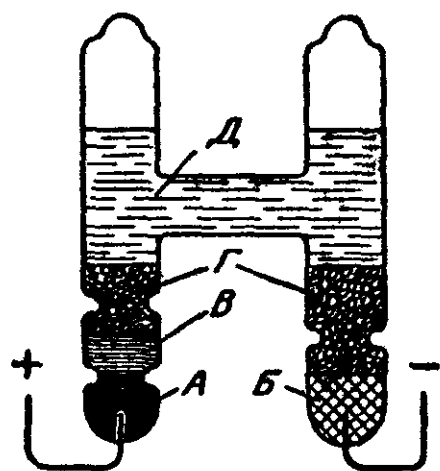


Рис 2-1. Устройство нормального насыщенного кадмиевого элемента.

та, располагая их вблизи нагревательных приборов или у окон, где они могут подвергнуться одностороннему нагреванию, например, солнечными лучами или охлаждению в зависимости от времени года.

Нормальный элемент нельзя подвергать толчкам, сотрясениям, и он не должен переворачиваться.

Нормальный элемент не следует применять при температурах ниже $+5^{\circ}\text{C}$ и выше $+30^{\circ}\text{C}$.

Нормальный элемент III класса имеет в основном такое же устройство, как и рассмотренный выше элемент I и II классов, отличаясь от последнего тем, что раствор электролита при температуре 20°C является ненасыщенным, т. е. свободные кристаллы в нем отсутствуют.

Значение э. д. с. элемента III класса при температуре 20°C должно быть от 1,0185 до 1,0195 в. Допустимое изменение э. д. с. за год не должно превышать 300 мкв. Изменение э. д. с. от температуры у этих элементов значительно меньше, чем у элементов II класса. Элемент III класса можно нагружать током до 10 мка.

Элементы I класса применяются для проверки элементов II класса для особо точных метрологических работ.

Элементы II класса применяются для проверки приборов классов точности 0,1; 0,2 и при всех точных лабораторных измерениях.

Элементы III класса применяются при технических измерениях, например, в переносных приборах и, в частности, автоматических компенсаторах.

2-2. МЕРЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Мерами электрического сопротивления являются образцовые катушки сопротивления. Такая катушка должна обладать точностью не ниже установленной стандартом для того класса точности, к которому она относится. Согласно ГОСТ 6864-62 катушки сопротивления по степени точности делятся на три класса: 0,01, 0,02 и 0,05.

Величина сопротивления катушек не должна изменяться с течением времени и должна в возможно меньшей степени быть зависимой от температуры и других факторов.

Материалом для катушек сопротивлений служит ман-

ганин — сплав (Cu—84% Ni—3% Mn—13%), обладающий малым температурным коэффициентом ($\alpha = 0,00001 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$), большим удельным сопротивлением ($\rho = 0,42\text{—}0,46 \text{ ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$) и малой термо-э. д. с. по отношению к меди (2 мкв на 1°C). Катушки сопротивления на малые токи наматываются из манганиновой проволоки, а на большие токи — из ленты.

На рис. 2-2 дана схема устройства одной из катушек сопротивления. Она состоит из латунного или фарфорового цилиндра *A*, на котором бифилярно намотана изолированная проволока. Концы проволоки соединяются с двумя парами зажимов *I* и *U*, которые укреплены на эбонитовой панели *B*. К этой же панели крепится металлический кожух *B*, который выполняется перфорированным при воздушном охлаждении катушки или сплошным при масляном охлаждении ее.

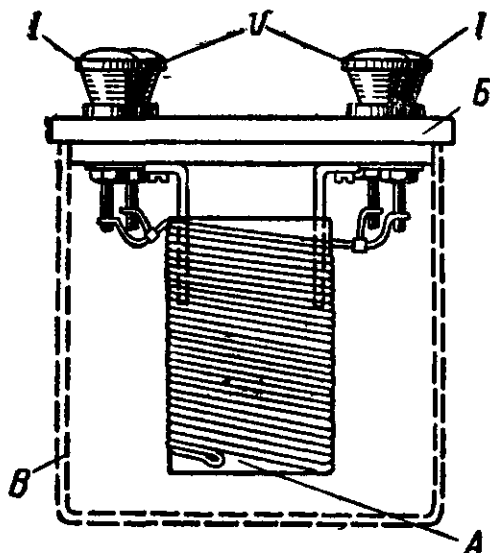


Рис. 2-2 Катушка сопротивления.

В некоторых конструкциях проволока крепится на металлический каркас, который припаивается к кожуху с внутренней стороны, таким образом, обмотка катушки оказывается расположенной в герметизированном пространстве между каркасом и кожухом, чем достигается защита ее от влаги и действия окружающей среды.

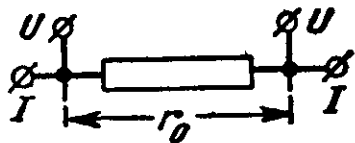


Рис. 2-3. Схема образцовой катушки сопротивления.

Зажимы катушки *I* (рис. 2-2 и 2-3) служат для включения ее в цепь тока и называются токовыми. Зажимы *U*, называемые потенциальными, предназначены для измерения напряжения на катушке.

Значение сопротивления, указанное на катушке (свидетельство), соответствует величине сопротивления, оказываемого току, идущему по катушке через зажимы *I* на участке между потенциальными зажимами.

Образцовые катушки изготавливаются на номинальные

значения сопротивлений: 0,00001; 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1; 10; 100; 1 000; 10 000; 100 000 *ом*.

В технике большое распространение получили магазины сопротивлений, представляющие собой набор катушек сопротивлений, заключенных в общий кожух и электрически соединенных между собой. Они применяются взамен образцовых катушек сопротивлений в тех



Рис. 2-4. Электрическая схема образцовой катушки сопротивления.

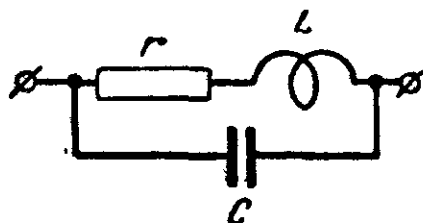


Рис. 2-5. Электрическая схема образцовой катушки сопротивления.

случаях, когда предъявляются меньшие требования к точности измерений, или для регулирования тока в цепи.

Согласно ГОСТ 7003-54 магазины сопротивлений делятся по степени точности на четыре класса: 0,02; 0,05; 0,1 и 0,2.

Катушки магазинов сопротивлений изготавливаются из изолированной манганиновой проволоки или ленты.

Катушки как образцовые, так и магазинов сопротивлений должны обладать возможно меньшей собственной индуктивностью и емкостью с тем, чтобы реактивное сопротивление катушки было возможно меньшим и, следовательно полное сопротивление катушки

$$Z = r \pm jx = ze^{\pm i\varphi} \quad (2-2)$$

при переменном токе было возможно близким к сопротивлению катушки при постоянном токе. Электрические схемы катушек даны на рис. 2-4 и 2-5.

Применяя различные способы намотки катушек, можно уменьшить реактивное сопротивление катушки x и ее фазный угол φ .

Применять фазный угол или его тангенс для оценки качества катушки неудобно, так как они зависят от ча-

стоты тока. Действительно при малых углах, характерных для катушек сопротивлений,

$$\varphi \approx \operatorname{tg} \varphi = \frac{x}{r} = \omega \tau. \quad (2-3)$$

Поэтому качество катушки принято оценивать постоянной времени τ — величиной, не зависящей от частоты.

Для катушки, собственной емкостью которой можно пренебречь (рис. 2-4), постоянная времени

$$\tau = \frac{L}{r}. \quad (2-4)$$

Для катушки, собственной емкостью которой пренебречь нельзя (рис. 2-5), постоянная времени

$$\tau = \frac{L}{r} - Cr. \quad (2-5)$$

Из последнего выражения следует, что у катушек с относительно малым значением сопротивления постоянная времени определяется преимущественно индуктивностью, а у катушек с большим значением сопротивления — емкостью.

Для получения так называемых безреактивных катушек, обладающих малой постоянной времени порядка $\pm 10^{-7}$ сек и меньше, предназначенных для работы в цепях переменного тока, применяются различные способы намотки.

В простейшем случае для катушек с небольшим сопротивлением уменьшение индуктивности достигается путем применения однослойной намотки на тонкую изоляционную пластину.

Часто для уменьшения индуктивности катушки наматываются бифилярно (рис. 2-2 и 2-6), так как при такой намотке н. с. каждых двух смежных витков взаимно компенсируются и индуктивность катушки будет незначительной. Но такие катушки с номинальным сопротивлением порядка 100 ом и выше, из-за большой разности потенциалов между отдельными смежными витками обладают заметной емкостью.

В двухслойной последовательно-встречной обмотке (рис. 2-7), широко применяемой для безреактивных катушек со средним значением номинальных сопротивлений, обмотка для уменьшения собственной емкости делится на несколько последовательно соединенных

частей (например, на рис. 2-7 на три части). Каждая часть обмотки располагается на отдельном каркасе в два слоя с взаимно-противоположным направлением намотки (рис. 2-8). При этом индуктивность уменьшается примерно так же, как и при бифилярной намотке, но емкость получается значительно меньшей. Это объясняется тем, что во внутреннем слое катушки идет ток одного направления, а в наружном слое — другого, противоположного направления. Раз-

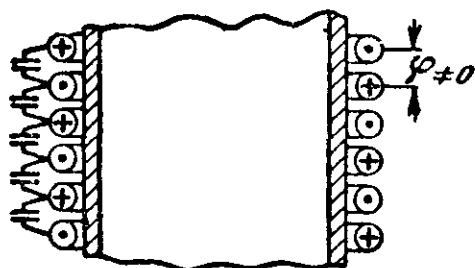


Рис. 2-6. Витки с током при бифилярной намотке.

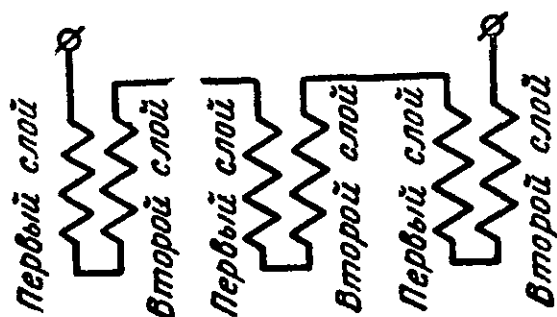


Рис. 2-7. Схема двухслойной последовательно-встречной обмотки.

ность потенциалов между двумя смежными витками одного слоя ничтожна, и емкости между ними нет. Междувитковая емкость возникает только между каждыми двумя витками, расположенными в разных слоях в одной плоскости (рис. 2-8).

В безреактивных катушках с большими значениями номинальных сопротивлений часто применяется двухслойная параллельно-встречная обмотка (рис. 2-9).

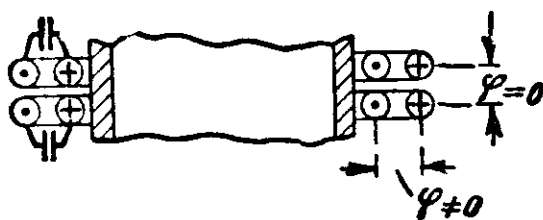


Рис. 2-8. Витки с током при двухслойной последовательно-встречной намотке.

Первая параллельная ветвь такой обмотки имеет сопротивление, равное двойному номинальному сопротивлению, и образует один слой иамотки. Вторая параллельная ветвь, имеющая такое же сопротивление, образует другой слой намотки, но с направлением намотки, противоположным первому слою.

В этом случае, как и в двухслойной последовательно-встречной обмотке, токи во внутреннем и наружном слоях обмотки имеют взаимно противоположные направления. Вследствие этого индуктивность этой намотки мала, как и у рассмотренной ранее двухслойной обмотки.

Емкость такой обмотки значительно меньше, чем емкость двухслойной последовательно-встречной обмотки, так как у упомянутой обмотки нет емкости между смежными витками как в одном слое, так и в другом слое обмотки. С другой стороны, падения напряжения в каждом витке как первой, так и второй параллельной ветви одинаковые, поэтому равна нулю и разность потенциалов между каждыми двумя витками, расположенными в одной плоскости, но принадлежащими к разным слоям или ветвям обмотки, следовательно, нет емкости и между этими витками обмотки (рис. 2-9).

В зависимости от устройства для включения катушек магазины сопротивлений делятся на штепсельные и рычажные.

В штепсельном магазине сопротивлений концы каждой катушки *А* присоединяются к двум смежным латун-

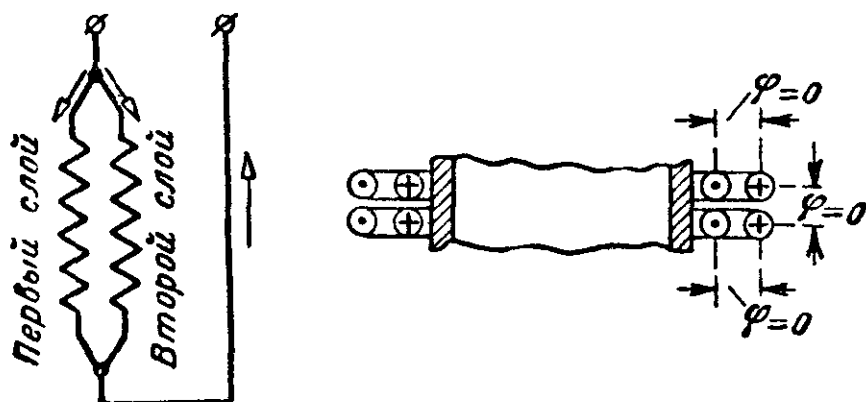


Рис. 2-9. Двухслойная параллельно-встречная обмотка.

ным пластинам *Б* (рис. 2-10), укрепленным на панели *В* из изоляционного материала. При необходимости выключить катушку концы ее накоротко замыкаются при помощи штепселя *Г*, вставляемого между соответствующими

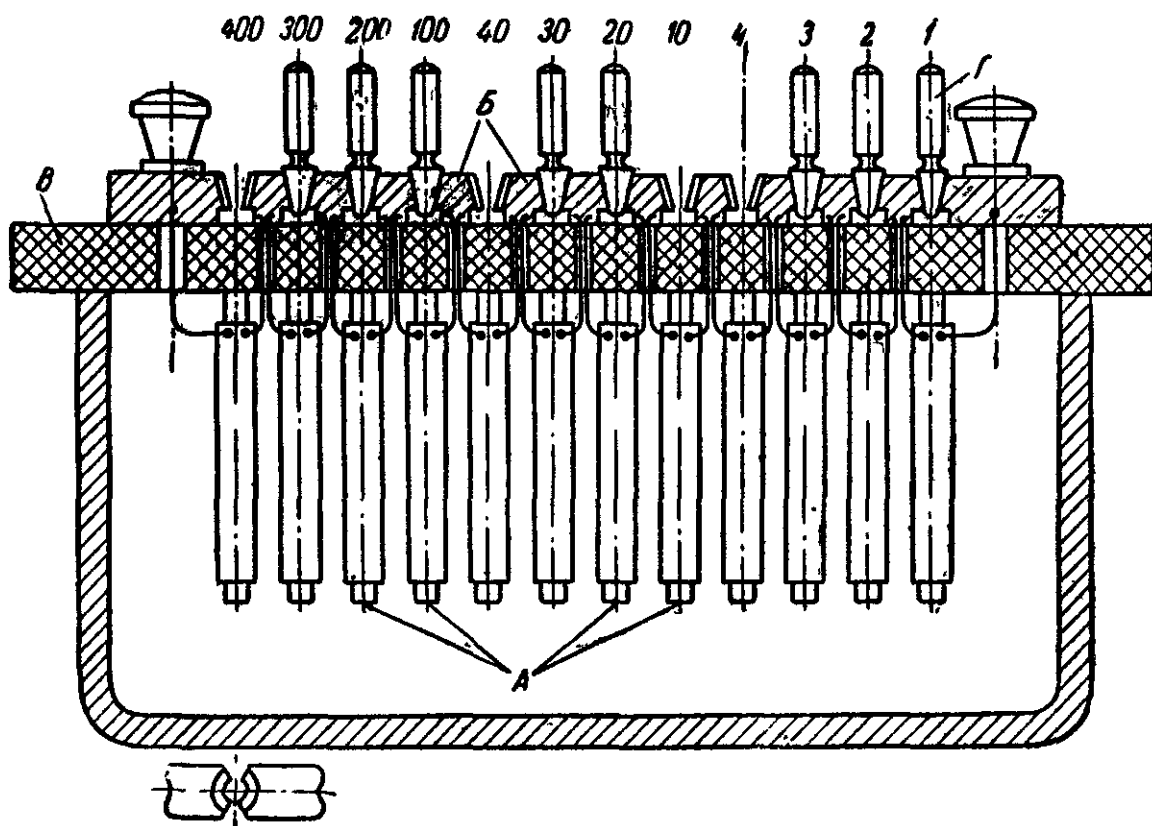


Рис. 2-10. Устройство штепсельного магазина сопротивлений.

щими латунными пластинами. Наоборот, при необходимости включить катушку соответствующий штепсель должен быть вынут. Для уменьшения контактных сопротивлений штепсели и их гнезда обтачиваются слегка на конус.

Сопротивления в магазине соединяются группами по четыре катушки, величины сопротивлений которых берут в отношении 1 : 2 : 3 : 4 или в отношении 1 : 2 : 2 : 5. Каждая следующая группа катушек имеет сопротивление в 10 раз больше предыдущей. При таком наборе катушек можно получить любую требуемую величину сопротивления со ступенями, равными сопротивлению катушки с наименьшим значением при наименьшем количестве катушек. Например, в магазине, изображенном на рис. 2-10, катушки имеют следующие величины сопротивлений в омах:

1	2	3	4
10	20	30	40
100	200	300	400

Этот магазин сопротивлений позволяет включить любую величину сопротивления от 1 до 1110 ом ступенями по 1 ом.

Во избежание нагревания катушки сопротивления сверх допустимых границ ее нельзя нагружать током выше значений, которые обычно указываются на отдельных катушках или магазинах сопротивлений.

При включении одной или нескольких катушек магазина сопротивления в цепь тока значение сопротивления принимается равным сумме номинальных значений сопротивлений включенных катушек. Действительная величина включенного сопротивления будет больше на величину, равную сумме контактных сопротивлений всех вставленных штепселей.

Переходное сопротивление штепселя при хорошем состоянии поверхности и хорошем нажатии имеет величину порядка $1 \cdot 10^{-4}$ ом; при загрязненной поверхности и плохом нажатии сопротивление контакта может увеличиться в десятки и сотни раз и, следовательно, погрешность, в особенности при малых сопротивлениях включенных катушек, будет весьма значительной.

Большое и непостоянное число включенных штепсельных контактов в рассмотренном разномерном мага-

зине сопротивлений, могущих дать значительную погрешность, является существенным их недостатком.

Декадный штепсельный магазин сопротивлений (рис. 2-11) состоит из нескольких декад, в которых имеется по девять одинаковых катушек сопротивлений, например: в первой декаде — по 1 ом, во второй — по

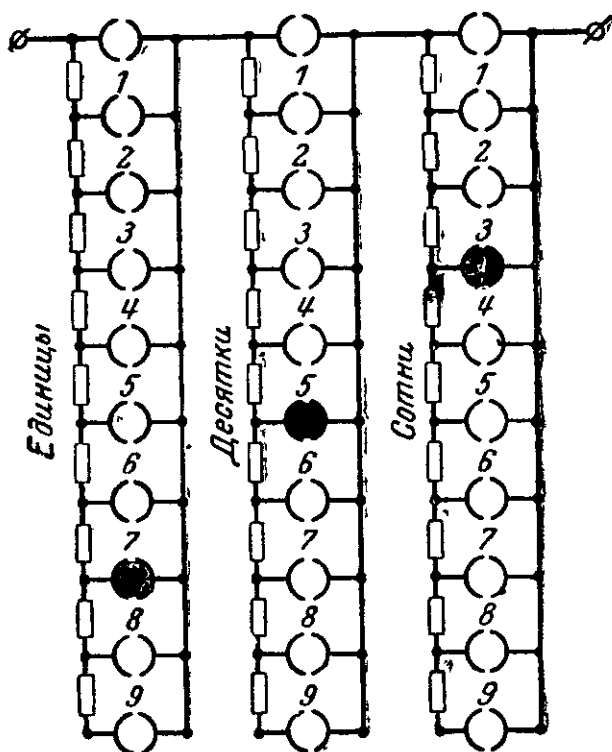


Рис 2-11. Схема декадного штепсельного магазина сопротивлений.

10 ом, в третьей — по 100 ом. Каждая декада имеет один штепсель, что увеличивает точность магазина. Однако существенным недостатком этого магазина является разрыв цепи тока при изменении величины сопротивления. Указанным недостатком не обладают рычажные декадные магазины сопротивлений (рис. 2-12).

Нетрудно видеть, что при одинаковом сопротивлении простого штепсельного и декадного магазинов сопротивлений в последнем число катушек примерно в $2\frac{1}{2}$ раза больше, что влечет за собой увеличение размеров и стоимости.

Путем некоторого усложнения схемы число отдельных катушек в каждой декаде магазина можно снизить до пяти. На рис. 2-13 дана схема магазина сопротивле-

ния типа Р-33 отечественного производства с шестью пятикатушечными декадами.

Несмотря на несколько большее переходное сопротивление на контактах у рычажного магазина сопротивлений, он находит все большее применение благодаря удобству в работе.

Образцовые катушки сопротивлений и магазины со-

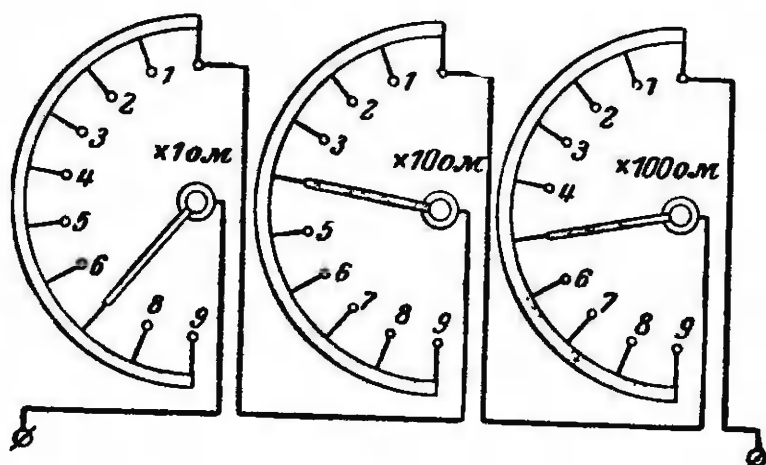


Рис. 2-12. Схема декадного рычажного магазина сопротивлений.

противлений изготавливаются или для работы только в цепях постоянного тока, или безреактивными — для работы в цепях переменного (и постоянного) тока.

Например, отечественная промышленность выпускает

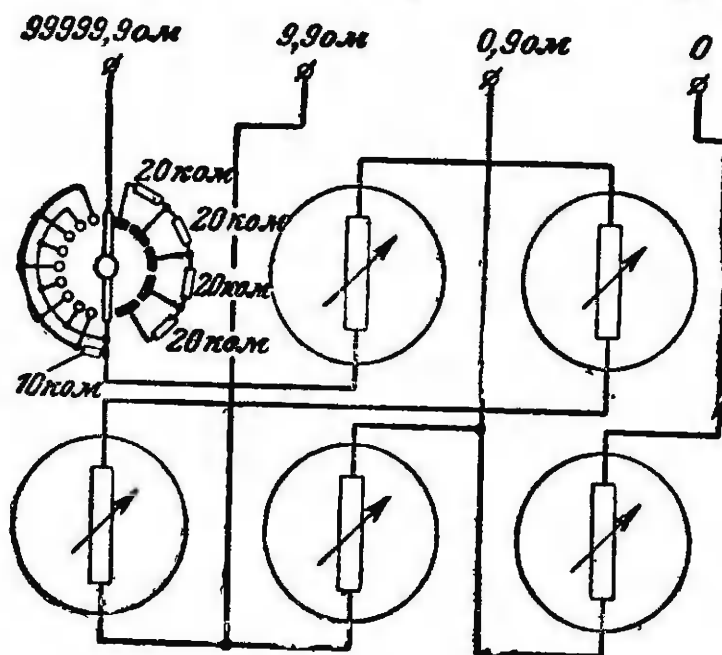


Рис. 2-13. Схема магазина сопротивлений Р-33 (5 декад изображены упрощенно).

безреактивные катушки сопротивления типа ОКСБ и безреактивные магазины сопротивления типов МСШБ, Р-58, МСРБ и Р-517; первые два — штепсельные, два последних — рычажные.

2-3. МЕРЫ ИНДУКТИВНОСТИ И ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ

Мерами индуктивности с постоянным значением являются катушки, обладающие постоянной установленной индуктивностью.

Образцовые катушки индуктивности (рис. 2-14) изготавливаются из медной изолированной проволоки, которая

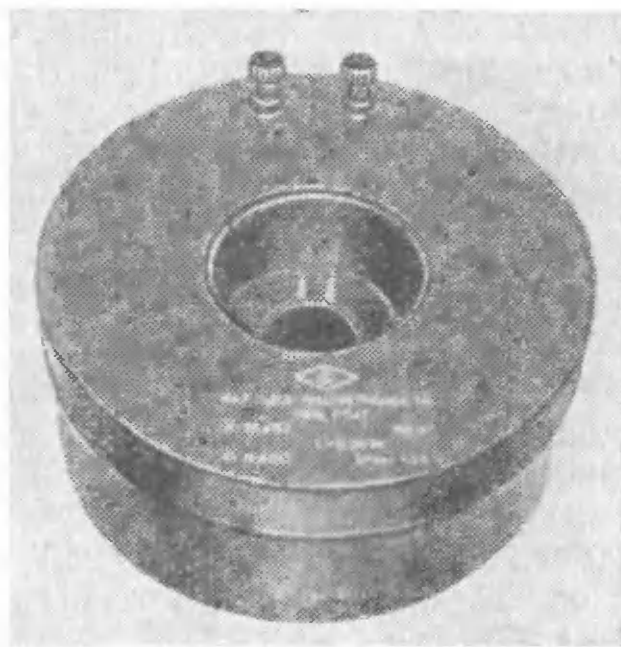


Рис. 2-14. Образцовая катушка индуктивности.

наматывается на фарфоровый или пластмассовый каркас. Для повышения постоянства индуктивности и улучшения изоляции катушка пропитывается парафином. Концы обмотки выводятся на торцевой стороне катушки.

Добротность катушки $Q = \omega L / r$ стремятся увеличить за счет уменьшения сопротивления r .

Катушки взаимной индуктивности имеют по две обмотки на одном каркасе.

Так как катушки изготавливаются из немагнитного материала, то индуктивность и взаимная индуктивность их не зависят от величины тока катушек.

Катушки индуктивности и взаимной индуктивности не должны перегружаться током во избежание нагревания.

Индуктивности образцовых катушек обычно имеют одно из следующих значений: 0,0001; 0,001; 0,01; 0,1; 1 *гн*.

Иногда находит применение в качестве образцовой катушки индуктивности катушка с переменной индуктивностью (вариометр). Вариометр состоит из двух катушек: неподвижной и подвижной, могущей поворачиваться вокруг оси примерно на 180°. Подвижная катушка располагается обычно внутри неподвижной. Индуктивность такой пары катушек изменяется в зависимости от их взаимного расположения. Магазин индуктивностей состоит из набора катушек индуктивностей, а иногда, кроме того, и из вариометра. Например, магазин индуктивностей типа Р-546 имеет три декады ($10 \times 0,1 + 10 \times 1 + 10 \times 10$ *мгн*) и вариометр с индуктивностью 0—0,1 *мгн*. Точность этого магазина $\pm (0,3—0,5) \%$.

2-4. МЕРЫ ЕМКОСТИ

Меры емкости должны обладать постоянством своей величины, малой зависимостью от температуры и частоты, малыми диэлектрическими потерями и большим сопротивлением изоляции.

Мерой емкости является образцовый или рабочий конденсатор с постоянным или переменным (регулируемым) значением емкости.

В качестве диэлектрика в конденсаторах применяются воздух, нейтральные газы под давлением или слюда.

Лучшими являются воздушные конденсаторы, но они имеют малую емкость (до 0,001 *мкф*). Они изготавливаются с цилиндрическими и плоскими электродами. Воздуш-

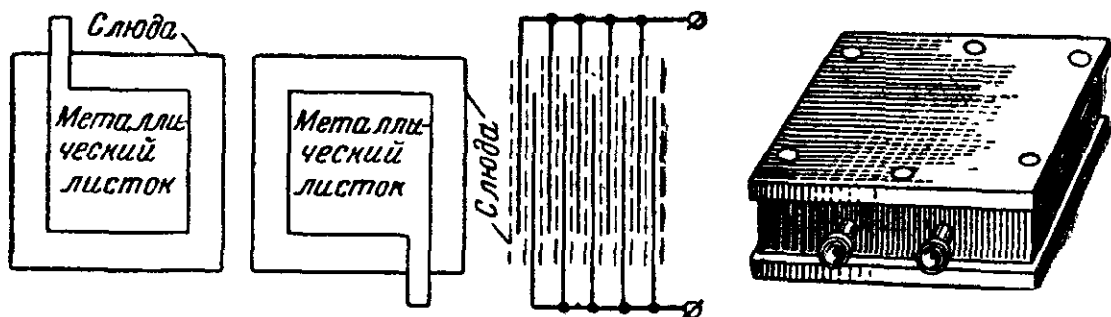


Рис. 2-15. Образцовый конденсатор со слюдяной изоляцией.

ный измерительный конденсатор переменной емкости имеет устройство, аналогичное общеизвестному конденсатору для радиоустановок. Он состоит из двух параллельно расположенных рядов полудисков, один из которых неподвижен, а другой может поворачиваться вокруг оси. Разным углом поворота подвижной части соответствуют различные значения емкости. Погрешность таких конденсаторов 0,05—0,1% и выше, температурный коэффициент емкости $\sim 0,002\%$ на 1°C .

Слюдяной конденсатор состоит из ряда металлических пластин, изолированных друг от друга слюдяными прокладками (рис. 2-15). Четные пластины соединены с одним, а нечетные — с другим зажимом конденсатора. Эти конденсаторы имеют температурный коэффициент около $0,005\%$ на 1°C , тангенс потерь 10^{-4} — 10^{-3} и точность $\pm 0,01$ — $0,5\%$.

Набор конденсаторов, помещенный в общий кожух, называется магазином емкостей.

На рис. 2-16 дана схема соединения магазина слюдяных конденсаторов типа МЕ-4, а на рис. 2-17 — типа МЕ-3 киевского завода. Пунктиром на схемах показаны экраны для защиты от влияния внешних полей. Эти магазины предназначены для работы в цепях переменного тока с частотой до 1500 гц. Точность их $\pm 0,5\%$.

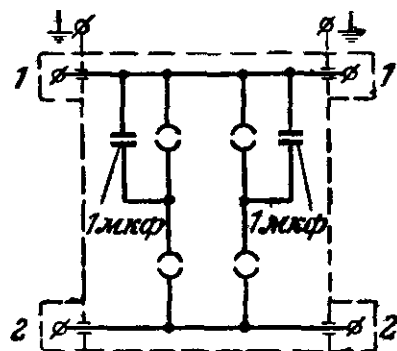


Рис. 2-16. Схема магазина емкостей типа МЕ-4.

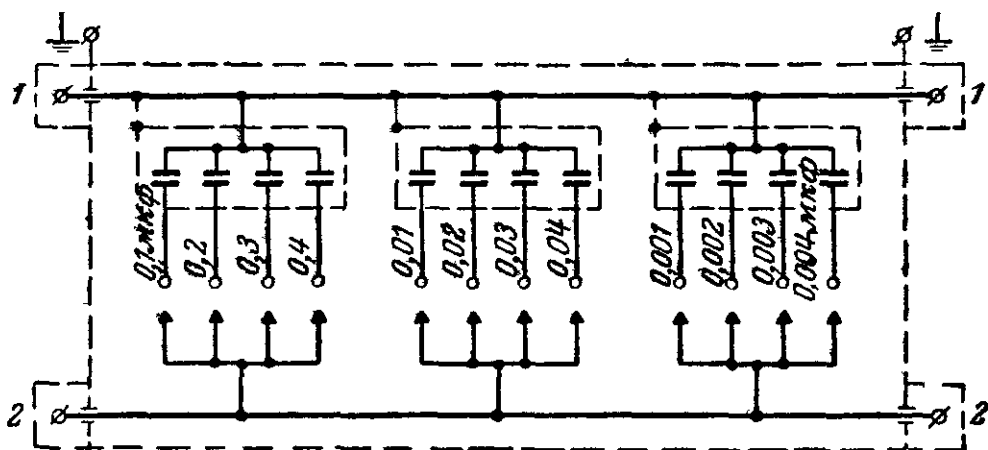


Рис. 2-17. Схема магазина емкостей типа МЕ-3.

2-5. ЕДИНИЦЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

С 1 января 1963 г. в СССР согласно ГОСТ 9867-61 устанавливается применение Международной системы единиц, обозначаемой символом СИ (или SI), основными единицами которой являются метр, килограмм, секунда, ампер, градус Кельвина и свеча.

Эта система должна применяться как предпочтительная во всех областях науки, техники и народного хозяйства, а также при преподавании.

Сокращенные обозначения основных единиц даны в табл. 2-1.

Таблица 2-1

Наименование величин	Единицы измерения	Сокращенные обозначения единиц измерений	
		русские	латинские
Длина	метр	<i>м</i>	<i>m</i>
Масса	килограмм	<i>кг</i>	<i>kg</i>
Время	секунда	<i>сек</i>	<i>s</i>
Сила электрического тока	ампер	<i>а</i>	<i>A</i>
Термодинамическая температура	градус Кельвина	<i>°К</i>	<i>°K</i>
Сила света	свеча	<i>св</i>	<i>cd</i>

Для основных единиц установлены следующие определения:

Метр — длина, равная 1 650 763,73 длин волн в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями $2p_{10}$ и $5d_5$ атома криптона-86.

Килограмм — единица массы — представлен массой международного прототипа килограмма.

Секунда — $1/31\,556\,925,9747$ часть тропического года для 1900 г. января 0 в 12 ч эфемеридного (равномерного) времени.

Ампер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ единиц силы Международной системы на каждый метр длины.

Таблица-22

Наименование величин	Единицы измерения	Сокращенные обозначения единиц измерения		Размер единицы
		русские	латинские или греческие	
Дополнительные единицы				
Плоский угол Телесный угол	радиан	рад	rad	
	стерадиан	стер	sr	
Производные единицы				
Площадь Объем Частота Плотность (объемная масса)	квадратный метр	м ²	м ²	(1 м) ²
	кубический метр	м ³	м ³	(1 м) ³
	герц	гц	Hz	1:(1 сек)
	килограмм на кубический метр	кг/м ³	kg/m ³	(1 кг):(1 м) ³
Скорость Угловая скорость Ускорение	метр в секунду	м/сек	m/s	(1 м):(1 сек)
	радиан в секунду	рад/сек	rad/s	(1 рад):(1 сек)
	метр на секунду в квадрате	м/сек ²	m/s ²	(1 м):(1 сек) ²
	радиан на секунду в квадрате	рад/сек ²	rad/s ²	(1 рад):(1 сек) ²
Сила Давление (механическое напряжение) Динамическая вязкость Кинематическая вязкость	ньютон	н	N	(1 кг)·(1 м):(1 сек) ²
	ньютон на квадратный метр	н/м ²	N/m ²	(1 кг)·(1 м):(1 сек) ²
	ньютон-секунда на квадратный метр	н·сек/м ²	N·s/m ²	(1 н)·(1 м) ²
	квадратный метр на секунду	м ² /сек	m ² /s	(1 н)·(1 сек):(1 м) ²

Наименование величин	Единицы измерения	Сокращенные обозначения единиц измерения		Размер единицы
		русские	латинские или греческие	
Работа, энергия, количество теплоты	джоуль	джс	J	(1 н)·(1 м)
Мощность	ватт	вт	W	(1 дж): (1 сек)
Количество электричества, электрический заряд	кулон	к	C	(1 а)·(1 сек)
Электрическое напряжение, разность электрических потенциалов, э. д. с.	вольт	в	V	(1 вт): (1 а)
Напряженность электрического поля	вольт на метр	в/м	V/m	(1 в): (1 м)
Электрическое сопротивление	ом	ом	Ω	(1 в): (1 а)
Электрическая емкость	фарада	ф	F	(1 к): (1 в)
Поток магнитной индукции	вебер	вб	Wb	(1 к)·(1 ом)
Индуктивность	генри	гн	H	(1 вб): (1 а)
Магнитная индукция	тесла	тл	T	(1 вб): (1 м) ²
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	а/м	A/m	(1 а): (1 м)
Магнитодвижущая сила	ампер	а	A	(1 а)
Световой поток	люмен	лм	lm	(1 св)·(1 стер)
Яркость	свеча на квадратный метр или нит	св/м ² или нт	cd/m ² nt	(1 св): (1 м) ²
Освещенность	люкс	лк	lx	(1 лм): (1 м) ²

Градус Кельвина — единица измерения температуры по термодинамической температурной шкале, в которой для температуры тройной точки воды установлено значение $273,16^\circ \text{K}$ (точно).

Свеча — единица силы света, значение которой принимается таким, чтобы яркость полного излучателя при температуре затвердевания платины была равна 60 св на 1 см^2 .

Кроме единиц, приведенных в табл. 2-1, устанавливаются единицы Международной системы, указанные в табл. 2-2.

Для дополнительных единиц установлены следующие определения:

Радян — угол между двумя радиусами круга, вырезающий на окружности дугу, длина которой равна радиусу.

Стерadian — телесный угол, вершина которого расположена в центре сферы и который вырезает на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Наименования кратных и дольных единиц образуются путем применения приставок, приведенных в табл. 2-3.

Таблица 2-3

Приставки к электрическим магнитным единицам

Наименование приставок	Отношение к главной единице	Обозначения	
		русским шрифтом	латинским или греческим шрифтом
Атто	10^{-18}	<i>a</i>	<i>a</i>
Фемто	10^{-15}	<i>ф</i>	<i>f</i>
Пико	10^{-12}	<i>п</i>	<i>p</i>
Нано	10^{-9}	<i>н</i>	<i>n</i>
Микро	10^{-6}	<i>мк</i>	μ
Милли	10^{-3}	<i>м</i>	<i>m</i>
Сантн	10^{-2}	<i>с</i>	<i>c</i>
Деци	10^{-1}	<i>д</i>	<i>d</i>
Дека	10	<i>дк</i>	<i>da</i>
Гекто	10^2	<i>г</i>	<i>h</i>
Кило	10^3	<i>к</i>	<i>k</i>
Мега	10^6	<i>мг</i>	<i>M</i>
Гига	10^9	<i>Г</i>	<i>G</i>
Тера	10^{12}	<i>Т</i>	<i>T</i>

С 1 января 1963 г. в СССР в качестве основной принята Международная система единиц СИ, в которой из шести основных единиц одна электрическая — ампер.

Для воспроизведения ампера, определение которого дано в ГОСТ 9867-61, применяются токовые весы.

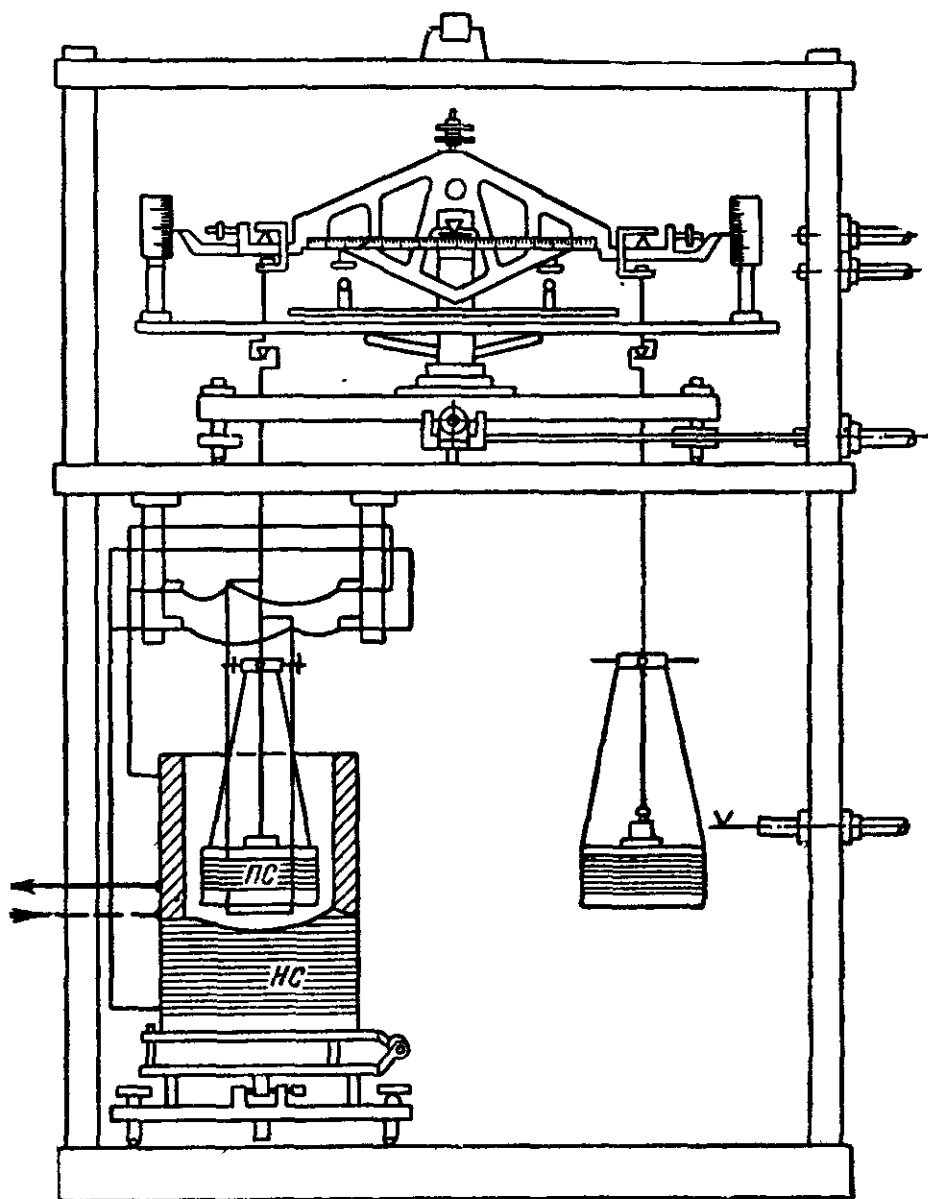


Рис. 2-18. Схема устройства токовых весов.

Токовые весы (рис. 2-18) являются равноплечими весами, у которых на одном плече коромысла подвешена катушка — однослойный соленоид, выполненный на каркасе из специального стекла. Последовательно с этой подвижной катушкой соединена неподвижная, имеющая аналогичное устройство.

При прохождении измеряемого тока по катушкам между ними возникает сила электродинамического взаимодействия. Сила, приложенная к подвижной катушке, уравнивается эталонными гирями, нагружаемыми на второе плечо коромысла,

Для нахождения силы тока в 1 а предварительно, исходя из данного для него определения и геометрических размеров катушек, производят точный расчет силы взаимодействия между катушками при наличии в них силы тока в 1 а. Затем нагружают второе плечо грузом найденного расчетного значения. Сила тока, установленная после этого на токовых весах, при которой будет достигнуто равновесие, имеет значение 1 а.

Токовые весы дают возможность определить силу тока с точностью до 0,001 %.

Вторым эталоном, значение которого определяется расчетным путем, является эталон единицы индуктивности — генри.

Он представляет собой соленоид — однослойную катушку, обмотка которой выполнена из медной проволоки, наложенной на каркас из специального стекла, с ничтожным температурным коэффициентом линейного расширения.

Индуктивность соленоида вычисляется по его геометрическим размерам.

Эталон ома является производным от эталона генри и единицы времени — секунды или обратной ей единицы частоты — герца.

Эталон ома выполняется в виде образцовой катушки, аналогичной рассмотренной ранее, но изготовленной с наибольшей возможной тщательностью.

Значение эталона ома определяется при помощи мостовых схем переменного тока, равновесие которых зависит только от значений сопротивления и индуктивностей схемы, а также частоты источника питания.

Эталоном вольта является нормальный насыщенный элемент, аналогичный рассмотренному ранее нормальному элементу. Электродвижущая сила его определяется путем сравнения ее с падением напряжения на эталоне ома при прохождении по нему тока силой в 1 а, который определяется при помощи токовых весов.

Глава третья

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

3-1. КЛАССИФИКАЦИЯ

В зависимости от способа, который применяется для сравнения измеряемой величины с единицей измерения, электроизмерительные приборы можно разделить на приборы непосредственной оценки и приборы сравнения.

Прибором непосредственной оценки называется прибор, дающий численное значение измеряемой величины по его отсчетному приспособлению (например, амперметр, ваттметр, счетчик).

Прибором сравнения называется прибор, служащий для сравнения измеряемой величины с мерами, которые часто бывают вмонтированы в прибор.

По способу получения отсчета измерительные приборы делятся на приборы с непосредственным отсчетом, приборы с управляемым отсчетом и приборы самопишущие.

Приборы с непосредственным отсчетом, кроме того, делятся на приборы показывающие и приборы интегрирующие.

Прибор с непосредственным отсчетом, будучи приведен в действующее состояние, дает показание, непосредственно отсчитываемое без каких-либо воздействий на его измерительный механизм или отсчетное приспособление (например, амперметр, ваттметр).

Прибор с управляемым отсчетом, будучи приведен в действующее состояние, требует для получения показаний соответствующего воздействия на измерительный механизм или отсчетное приспособление (например, измерительный мост, компенсатор).

Прибор с а м о п и ш у щ и й, будучи приведен в действующее состояние, записывает свои показания на бумаге (например, самопишущий вольтметр).

П о к а з ы в а ю щ и м прибором называется прибор, дающий значение измеряемой величины, соответствующее моменту измерения (например, амперметр, вольтметр).

И н т е г р и р у ю щ и м прибором называется прибор, дающий суммарное числовое значение измеряемой величины, определяемое по его счетному механизму.

Для нахождения значения измеряемой величины по счетному механизму из полученного его показания надо вычесть то показание, которое было на нем до начала измерения (например, полученное показание счетчика 4 587 квт·ч; показание счетчика до начала измерения 4 087 квт·ч; измеренная энергия $4\,587 - 4\,087 = 500$ квт·ч).

И з м е р и т е л ь н о й у с т а н о в к о й называют совокупность измерительных приборов, мер и приспособлений, объединенных в одно целое общей схемой или методом измерения (например, компенсационная установка для поверки образцовых приборов, состоящая из компенсатора, нормального элемента, образцовой ка-

тушки сопротивления, гальванометра, вспомогательных источников питания и реостатов).

Общие технические требования на электроизмерительные приборы и вспомогательные части к ним даны в ГОСТ 1845-59.

Электроизмерительные приборы делятся по роду измеряемой величины (табл. 3-1) и по роду тока.

Приборы с непосредственным отсчетом, кроме того, делятся по следующим признакам: по принципу действия в зависимости от системы; по степени точности; по степени защищенности от внешних полей; по условиям эксплуатации; по устойчивости к механическим воздействиям; по характеру применения; по способу монтажа; по форме кожуха; по защищенности кожухами; по габаритным размерам.

По роду тока приборы делятся на приборы постоянного тока; приборы переменного однофазного и трехфазного тока; приборы постоянного и переменного тока.

Электроизмерительные приборы по принципу действия делятся на следующие системы:



1. Магнитоэлектрическая система, характеризующаяся наличием постоянного магнита и контура с током. По перемещению подвижной части (контур с током или магнита), вызванному силами взаимодействия между полем магнита и контуром с током, судят о значении измеряемой величины.

2. Электромагнитная система, в которой используется действие одной или нескольких катушек с токами на одну или несколько частей из мягкого ферромагнитного материала, обычно составляющих подвижную часть прибора. По перемещению подвижной части судят о значениях измеряемой величины.

3. Электродинамическая система, характеризующаяся наличием нескольких контуров с токами, одни из которых неподвижны, а другие могут перемещаться. По перемещению подвижной части, вызванному электродинамическими усилиями, судят о значениях измеряемой величины.

Приборы электродинамической системы, в которых для усиления магнитного поля применяются магнитопроводы из ферромагнитного материала, получили название ферродинамических.

**Деление электроизмерительных приборов по роду
измеряемой величины**

№ п/п.	Род измеряемой прибором величины	Название прибора	Условные обозначения прибора
1	Сила тока	Амперметр	
2	Напряжение	Вольтметр	
3	Мощность	Ваттметр	
4	Энергия	Счетчик киловатт- часов	
5	Количество элек- тричества	Счетчик ампер-часов	
6	Сдвиг фаз	Фазометр	
7	Частота	Частотомер	
8	Сопротивление	Омметр, мегомметр	
9	Индуктивность	Геириметр	
10	Емкость	Фарадометр	
11		Самопишущий ам- перметр	
12		Самопишущий вольтметр	
13		Самопишущий ватт- метр	

4. Индукционная система, характеризующаяся применением нескольких контуров с переменными токами, создающими магнитные поля, которые наводят токи в подвижной части прибора, вызывая ее движение.

5. Тепловая система, в которой отклонение подвижной части прибора является следствием удлинения или изменения формы или объема тела, нагреваемого измеряемым током.

6. Термоэлектрическая система, характеризующаяся применением одной или нескольких термопар, дающих под влиянием тепла, выделяемого измеряемым током, постоянный ток в измерительный механизм магнитоэлектрической системы.

7. Выпрямительная система характеризуется применением одного или нескольких контактных выпрямителей и измерительного механизма магнитоэлектрической системы, соединенных в схему, позволяющую производить измерения электрических величин переменного тока.

8. Электростатическая система, характеризующаяся применением нескольких проводников и одного или нескольких диэлектриков, образующих конденсатор, в котором под влиянием электрических сил подвижные проводники или диэлектрики перемещаются относительно неподвижных.

9. Вибрационная система (резонансная), характеризующаяся применением ряда пластинок, настроенных на разные периоды собственных колебаний и позволяющих производить измерение частоты благодаря резонансу колеблющейся пластинки с измеряемой частотой.

В табл. 3-2 даны условные обозначения систем электроизмерительных приборов согласно государственному общесоюзному стандарту.

По степени точности показывающие и самопишущие электроизмерительные приборы (ГОСТ 1845-59) делятся на восемь классов: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4.

По степени защищенности от внешних полей приборы делятся на категории I и II.

По условиям эксплуатации приборы делятся на следующие группы:

Группа А — приборы, предназначенные для работы в закрытых сухих отапливаемых помещениях при тем-

**Условные обозначения, наносимые на
электроизмерительные приборы и вспомогательные
части ГОСТ 1845-59**

		Условное обозначение	
		С механическим противодействующим моментом	Логометры (безмеханического противодействующего момента)
<i>1. Обозначения принципа действия прибора</i>			
Магнитоэлектрическая	С подвижной рамкой	1	13
	С подвижным магнитом	2	14
Электромагнитная	Неполяризованная	3	15
	Поляризованная	4	
Электродинамическая	Электродинамическая	5	16
	Ферродинамическая	6	17
Индукционная	Индукционная	7	18
	Магнитондукционная	8	
Тепловая	С нагреваемой проволокой	9	
	Биметаллическая	10	
Электростатическая		11	
Вибрационная		12	

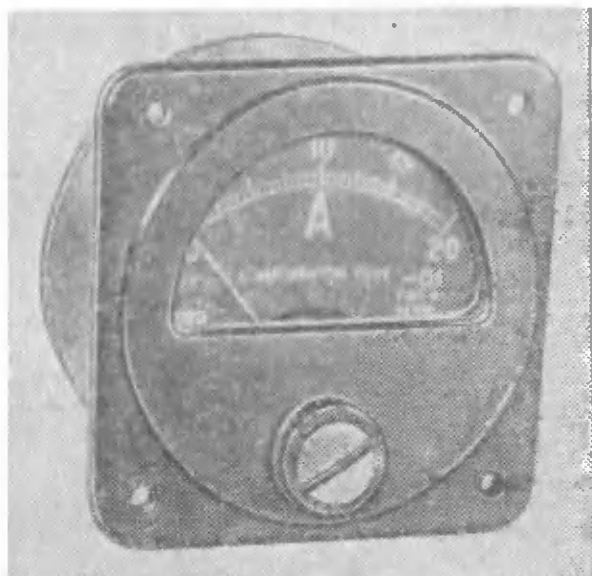
	Условное обозначение		Условное обозначение
<p>2. <i>Дополнительные обозначения по виду преобразователя</i></p> <p>Термо преобразователь изолированный</p> <p>Термопреобразователь неизолированный</p> <p>Выпрямитель полупроводниковый</p> <p>Выпрямитель электро-механический</p> <p>Электронный преобразователь</p> <p>Вибрационно-импульсный преобразователь</p>	<p>1 </p> <p>2 </p> <p>3 </p> <p>4 </p> <p>5 </p> <p>6 </p>	<p>Магнитоэлектрический прибор I категории защищенности от магнитных полей</p> <p>Электростатический прибор I категории защищенности от электрических полей</p> <p>5. <i>Обозначения рода тока</i></p> <p>Постоянный ток</p> <p>Переменный ток</p> <p>Трехфазный ток</p> <p>Трехфазный ток при неравномерной нагрузке фаз</p> <p>Прибор с одноэлементным измерительным механизмом</p> <p>Прибор с двухэлементным измерительным механизмом</p> <p>Прибор с трехэлементным измерительным механизмом</p>	<p>12 </p> <p>13 </p> <p>14 </p> <p>15 </p> <p>16 </p> <p>17 </p> <p>18 </p> <p>19 </p> <p>20 </p>
<p>3. <i>Примеры применения обозначений</i></p> <p>Термоэлектрический прибор (с изолированным преобразователем и магнитоэлектрическим механизмом)</p> <p>Выпрямительный прибор (с полупроводниковым выпрямителем и измерительным механизмом с подвижным магнитом)</p> <p>Электронный прибор с электростатическим измерительным механизмом</p>	<p>7 </p> <p>8 </p> <p>9 </p>	<p>6. <i>Обозначения класса точности, положения прибора и пр.</i></p> <p>Класс точности при нормировании погрешности в процентах от диапазона измерения, например, 1,5</p> <p>Класс точности при нормировании погрешности в процентах от длины шкалы, например, 1,5</p> <p>Горизонтальное положение шкалы</p> <p>Вертикальное положение шкалы</p> <p>Наклонное положение шкалы под углом к горизонту, например, 60°</p>	<p>1,5</p> <p>1,5 </p> <p>21 </p> <p>22 </p> <p>23 </p> <p>24 </p>
<p>4. <i>Дополнительные обозначения по защите от полей</i></p> <p>Защита от внешних магнитных полей (I категория защищенности)</p> <p>Защита от внешних электрических полей (I категория защищенности)</p>	<p>10 </p> <p>11 </p>		

	Условное обозначение		Условное обозначение
Направление ориентировки прибора в земном магнитном поле	1 	7. Условные обозначения групп приборов по устойчивости и др. Для закрытых сухих неотапливаемых помещений (группа Б)	Б
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ	2 	Для полевых и морских условий (группа В)	В ₁ ; В ₂
Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	3 	Для условий влажного тропического климата	Т
Осторожно! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак красного цвета)	4 	Обыкновенный с повышенной механической прочностью	ОП
Внимание! Смотри дополнительные указания	5 	Тряскопрочные	ТП
Общий зажим Генераторный зажим	6 * 	Вибропрочные	ВП
Зажим, соединенный с подвижной частью прибора	7 	Нечувствительные к тряске	ТН
Зажим, соединенный с экраном	8 з 	Нечувствительные к вибрации	ВН
Зажим, соединенный с корпусом	9 	Ударопрочные	УП
Зажим для заземления	10 	Пример. Прибор с вертикальной шкалой группы В, вибрационно-прочный	В ₁ ⊥ ВП
Корректор	11 	Сопротивление добавочное	ДС
Нормальное (номинальное) значение	500 гц 	Шунт отдельный (наружный)	НШ
Нормальная (номинальная) область	45—550 гц 	Шунт отдельный калиброванный 75 мВ	НШ75mV
Номинальное значение (подчеркнуто) и расширенная область	20— <u>50</u> —120 гц 	Трансформатор тока 400/5 А	ТТ $\frac{400}{5}$
		Трансформатор напряжения 6 000/100 В	ТН $\frac{6000}{100}$

пературе окружающего воздуха $+10 \div +35^{\circ}\text{C}$ и при относительной влажности при температуре 30°C до 80%.

Группа Б — то же для работы в закрытых неотапливаемых помещениях, при температуре окружающего воз-

а)



б)

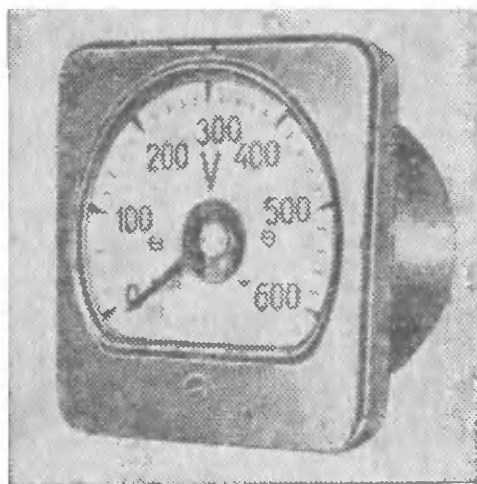


Рис. 3-1. Стационарные приборы с круглым корпусом.

а — с углом шкалы 90° ; б — с углом шкалы более 200° .

духа $-30 \div +40^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха при температуре $+30^{\circ}\text{C}$ до 90%.

Группа В — то же для работы в полевых и морских условиях. Группа В подразделяется на две подгруппы: В₁ для температур $-40 \div +50^{\circ}\text{C}$; В₂ для температур

—50 ÷ +60° С и относительной влажности воздуха при температуре +35° С до 95%!

Все приборы, предназначенные для работы в условиях тропического климата, имеют обозначение типа с буквой Т. Например: гальванометры М17, выпускаемые в тропическом исполнении, предназначены для ра-

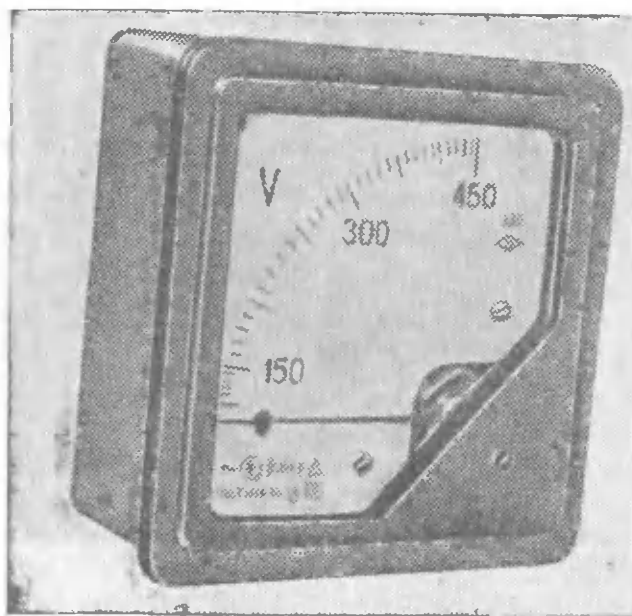


Рис. 3-2. Стационарный прибор с прямоугольным утопленным (стандартным) корпусом.

боты при температуре окружающего воздуха от +10 до +50° С и относительной влажности до 98% имеют обозначение М17Т.

По устойчивости к механическим воздействиям приборы делятся на обыкновенные, тряскопрочные, вибропрочные, ударопрочные, тряскоустойчивые и виброустойчивые.

Тряскопрочными, вибропрочными и ударопрочными считаются приборы, способные после тряски, вибраций или ударных сотрясений продолжать выполнять свои функции.

Тряскоустойчивыми и виброустойчивыми считаются приборы, способные выполнять свои функции во время тряски или вибраций.

По характеру применения приборы делятся на стационарные (рис. 3-1 и 3-2) и переносные (рис. 3-3 и 3-4).

По способу монтажа приборы делятся на щит-

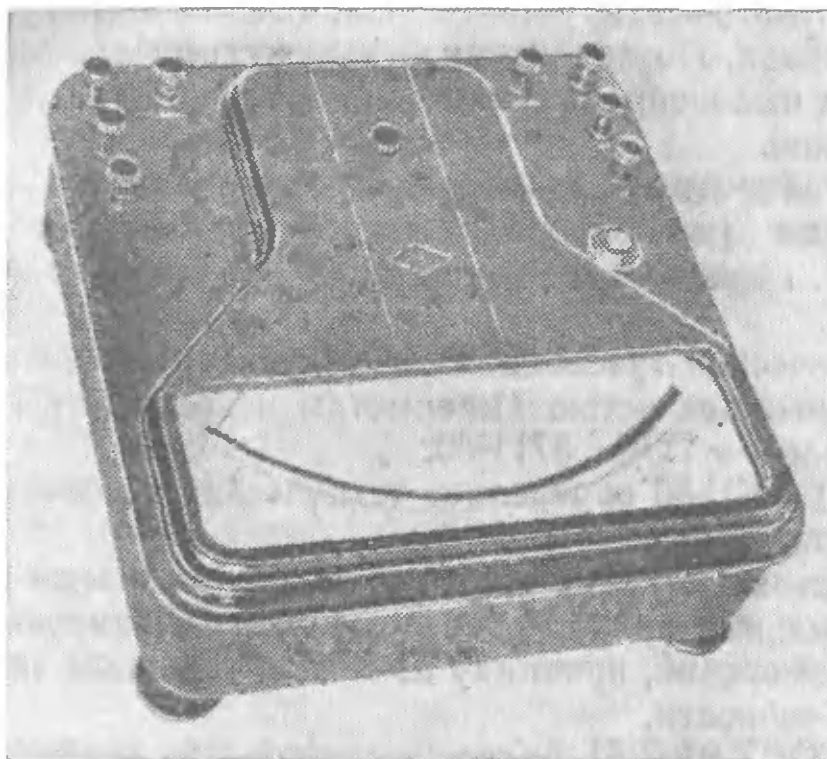


Рис. 3-3. Переносный многопредельный прибор типа М-502, класса 0,1.

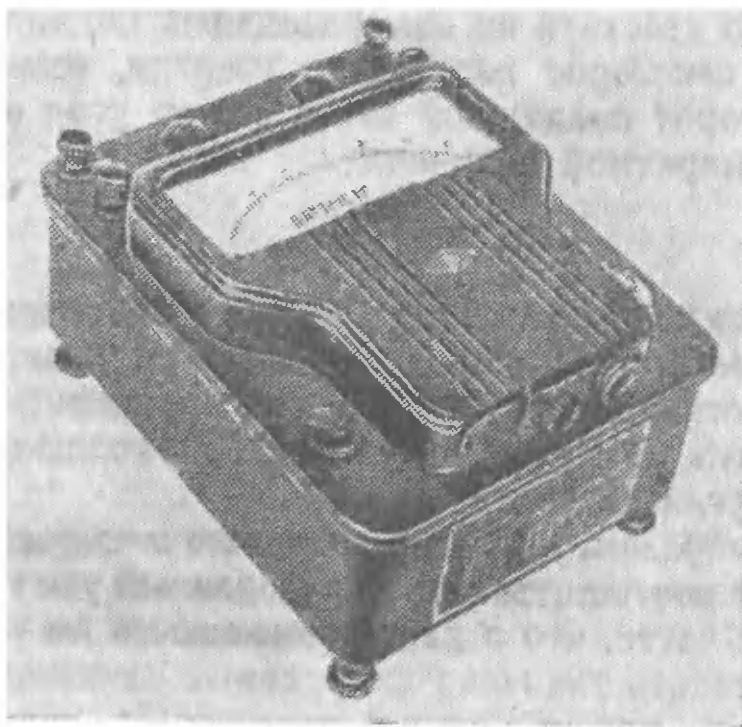


Рис. 3-4. Переносный прибор (ваттметр) типа Д-522, класса 1.

товые, пультные и устанавливаемые на колонках или кронштейнах. По защищенности кожухами приборы делятся на пыленепроницаемые, водонепроницаемые и герметические.

По габаритным размерам приборы делятся на миниатюрные (до 50 мм), малогабаритные (от 50 до 100 мм), средние (от 100 до 200 мм), большие (свыше 200 мм).

Технические требования на выпускаемые отечественной промышленностью амперметры и вольтметры сформулированы в ГОСТ 8711-60.

ГОСТ 8476-60 определяет технические требования на ваттметры и варметры.

В настоящее время в особую группу выделены радиоизмерительные приборы, которые классифицируются по видам измерений, принципу действия, условиям эксплуатации и точности.

По ГОСТ-9763-61 радиоизмерительные приборы подразделяются на пять групп (в зависимости от условий эксплуатации), удовлетворяющих определенным климатическим и механическим требованиям.

3-2. СХЕМА РАБОТЫ ПРИБОРА НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ

В простейшем случае измеряемая величина x , непосредственно действуя на измерительный механизм, сообщает ему некоторое количество энергии, вызывая тем самым поворот подвижной части его на угол α , зависящий от измеряемой величины:

$$\alpha = f(x).$$

Для того чтобы каждому значению измеряемой величины соответствовал определенный угол поворота подвижной части прибора, необходимо вращающий момент уравновесить моментом, ему противоположным и зависящим от угла поворота.

Таким образом, каждому значению измеряемой величины будет соответствовать определенный угол поворота подвижной части, что и дает возможность по углу поворота определять значение измеряемой величины.

Примером может служить электромагнитный амперметр (рис. 3-5), в котором измеряемый ток вызывает

намагничивание сердечника и втягивание его внутрь катушки, обеспечивая тем самым поворот подвижной части.

В большинстве случаев измеряемая величина не может непосредственно вызвать поворот подвижной части. Например, непосредственное измерение напряжения измерительным механизмом электромагнитной системы невозможно, так как угол поворота подвижной части этого измерительного механизма определяется не напряжением, а током. В таком случае используют измеряемую величину для получения вспомогательной величины, могущей непосредственно вызвать поворот подвижной части измерительного механизма. При этом вспомогательная величина y должна быть однозначно зависимой от измеряемой величины x , т. е.

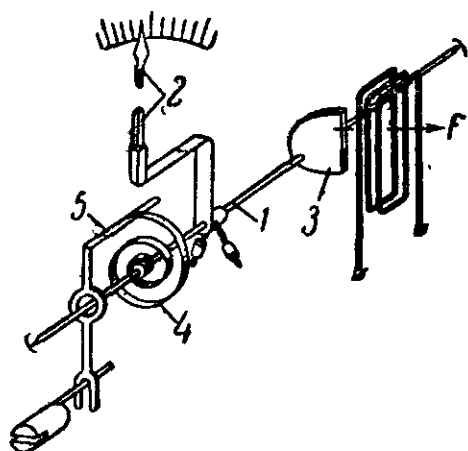


Рис. 3-5. Схема устройства электромагнитного амперметра.

$$y = F(x). \quad (3-1)$$

При действии этой вспомогательной величины на измерительный механизм его подвижная часть повернется на угол α , зависящий как от вспомогательной величины

$$\alpha = \varphi(y), \quad (3-2)$$

так и от измеряемой величины

$$\alpha = \varphi(y) = \varphi[F(x)] = f(x). \quad (3-3)$$

Эта зависимость и дает возможность по углу поворота подвижной части прибора определить значение измеряемой величины.

Таким образом, большинство электроизмерительных приборов непосредственной оценки состоит из двух основных частей: измерительной цепи (схемы) и измерительного механизма.

Измерительная цепь при воздействии на нее измеряемой величины обеспечивает получение вспомогательной электрической величины, однозначно зависящей от первой.

Измерительный механизм — механизм, при воздействии на который измеряемой или функционально связанной с ней вспомогательной величины происходит перемещение его подвижной части. По углу поворота или по линейному перемещению подвижной части определяется значение измеряемой величины.

Измерительный механизм каждого прибора состоит из двух основных частей: неподвижной и подвижной.

Несмотря на разнообразие применяемых измерительных механизмов, которые рассмотрены в гл. 4, здесь остановимся на общей схеме устройства подвижной части их.

Подвижная часть у большинства измерительных механизмов имеет ось 1 (рис. 3-5), заточенные концы которой — керны — располагаются в опорах — подпятниках. На оси укрепляются указательная стрелка — указатель 2 и рабочий элемент 3 , который у одних приборов представляет собой катушку, у других — алюминиевый диск, у третьих — стальной сердечник и т. д.

3-3. ВРАЩАЮЩИЙ И ПРОТИВОДЕЙСТВУЮЩИЙ МОМЕНТЫ

При действии на прибор измеряемой величины возникают силы, образующие вращающий момент M , действующий на рабочий элемент. Получение вращающих моментов для отдельных систем измерительных механизмов рассмотрено ниже в гл. 4.

Противодействующий момент $M_{пр}$ у большинства стрелочных приборов создается спиральной пружиной 4 (рис. 3-5).

Один конец пружины крепится на оси прибора, другой — на поводке корректора 5 , который дает возможность перед измерением установить стрелку прибора на нулевом делении шкалы.

В приборах, у которых вращающий момент относительно мал, противодействующий момент создается или двумя растяжками (рис. 3-6, а), на которых крепится подвижная часть, или подвесом.

Применение растяжек является прогрессивным методом установ-

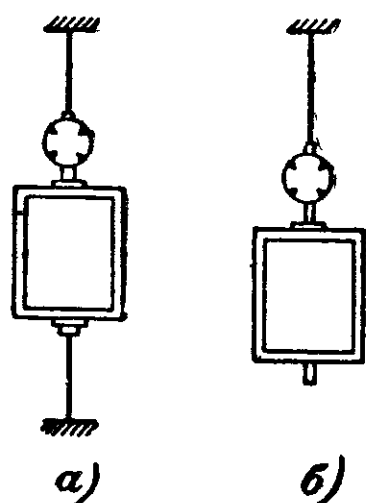


Рис. 3-6. Крепление подвижной части.

а — на растяжках; б — на подвесе.

ки подвижной части приборов, позволяющим значительно повысить чувствительность и снизить мощность потерь прибора примерно в 10 раз. Кроме того, исключается износ опор, устраняется погрешность от трения.

Величина противодействующего момента, создаваемого закручиванием спиральной пружины растяжек или подвеса, пропорциональна углу закручивания и, следовательно, углу поворота подвижной части

$$M_{\text{пр}} = D\alpha, \quad (3-4)$$

где $D = \frac{M_{\text{пр}}}{\alpha}$ — удельный противодействующий момент, характеризующий жесткость пружины, растяжек, подвеса, — величина, постоянная для данного устройства. У приборов с пружиной, растяжками или подвесом при появлении вращающего момента подвижная часть будет поворачиваться только на тот угол, при котором будет создан противодействующий момент, равный вращающему.

Так как вращающий момент прибора зависит от измеряемой величины

$$M = f_1(x), \quad (3-5)$$

то для положения равновесия подвижной части, определяемого равенством моментов

$$M = M_{\text{пр}}, \quad (3-6)$$

получим:

$$D\alpha = f_1(x), \quad (3-7)$$

откуда

$$\alpha = \frac{1}{D} f_1(x) = f(x). \quad (3-8)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части прибора однозначно зависит от измеряемой величины.

В простейшем случае, например для приборов магнитоэлектрической системы,

$$M = f_1(x) = k_1 x, \quad (3-9)$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_1}{D} x = S_x x, \quad (3-10)$$

т. е. угол поворота подвижной части прибора пропорционален измеряемой величине x .

3-4. УСТАНОВЛИВАЮЩИЙ МОМЕНТ

Положение равновесия подвижной части прибора определяется равенством вращающего и противодействующего моментов (3-6), (3-7).

На рис. 3-7 даны кривые вращающего (при неизменной измеряемой величине) и противодействующего моментов в зависимости от угла поворота подвижной части прибора.

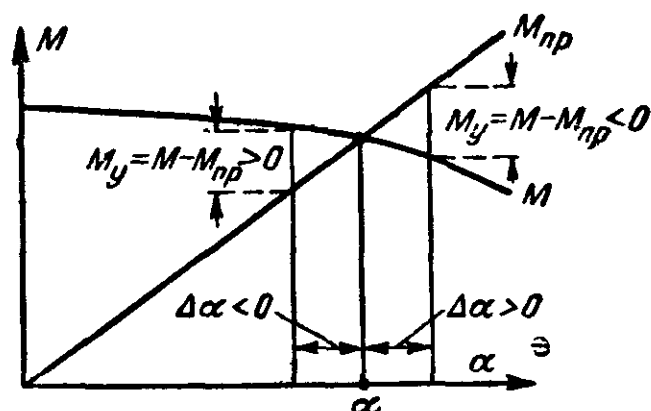


Рис. 3-7. Графики вращающего противодействующего моментов и устанавливающий момент.

Точка пересечения этих графиков и определяет положение равновесия подвижной части, по которому находится значение измеряемой величины.

Если вывести подвижную часть измерительного прибора из положения равновесия, повернув ее на угол $\Delta\alpha$ (рис. 3-7), то возникнет момент, называемый устанавливающим, стремящийся вернуть подвижную часть в положение равновесия.

Устанавливающий момент равен разности вращающего и противодействующего моментов, т. е.

$$M_y = M - M_{пр}. \quad (3-11)$$

Если $\Delta\alpha > 0$, то подвижная часть повернута от положения равновесия в сторону нарастающих значений (рис. 3-7). В этом случае $M_{пр} > M$, и устанавливающий момент $M_y = M - M_{пр} < 0$, т. е. имеет отрицательное значение, будучи направлен противоположно вращающему.

Если $\Delta\alpha < 0$, то подвижная часть повернута от положения равновесия в сторону убывающих значений. В этом случае $M_{пр} < M$, и устанавливающий момент $M_y = M - M_{пр} > 0$, т. е. имеет положительное значение, имея направление, совпадающее с вращающим.

Большой устанавливающий момент при одном и том же значении $\Delta\alpha$ обеспечивает более быструю и надежную установку подвижной части в положение равновесия.

Для того чтобы можно было сравнивать между собой различные приборы, в отношении устанавливающего момента пользуются не абсолютным значением его, а относительным, беря отношение устанавливающего момента к соответствующему приращению угла поворота, т. е.

$$M'_y = \frac{M_y}{\Delta\alpha}.$$

M'_y называется удельным устанавливающим моментом.

3-5. МОМЕНТ ТРЕНИЯ

У большинства электроизмерительных приборов подвижная часть крепится на оси. Керны оси для уменьшения трения опираются на подпятники (рис. 3-8) из камня (агат, рубин) или бронзы. Керны и подпятники хорошо полируются.

Подпятник (рис. 3-8) крепится в упорном винте, который удерживается от вращения стопорным винтом.

При движении подвижной части вследствие трения в опорах возникает момент трения $M_{тр}$, направленный в сторону, противоположную ее движению. Момент трения на основании опытных данных приближенно пропорционален весу подвижной части в степени 1,5, т. е.

$$M_{тр} = k_{тр} G^{1,5}, \quad (3-12)$$

где $k_{тр}$ — коэффициент пропорциональности.

При измерении величины x_1 прибором, вращающий момент которого

$$M_1 = k_1 x_1, \quad (3-13)$$

при отсутствии трения подвижная часть установится в положение α_1 , при котором

$$M_1 = M_{тр} = D\alpha_1,$$

откуда

$$\alpha_1 = \frac{M_1}{D}. \quad (3-14)$$

Сказанное иллюстрируется графиком на рис. 3-9, по оси абсцисс которого отложены углы, а по оси ординат — моменты. Ординаты точек прямой, параллельной оси

абсцисс, обозначают вращающий момент, созданный измеряемой величиной x_1 , а ординаты прямой, проходящей через начало координат, — противодействующие моменты, созданные пружиной.

При наличии трения в опорах при увеличении измеряемой величины от 0 до x_1 подвижная часть не дойдет

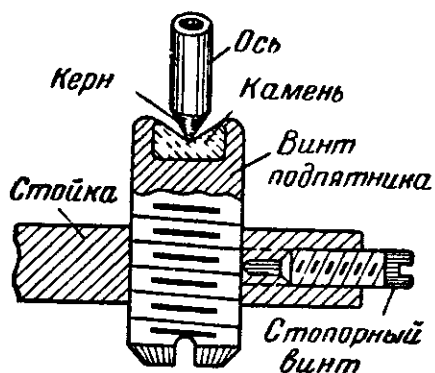


Рис. 3-8. Подпятник измерительного механизма.

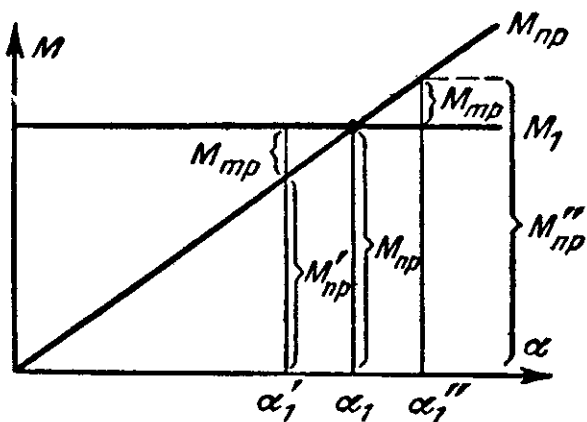


Рис. 3-9. Графики вращающего и противодействующего моментов и момент трения.

до прежнего положения α_1 на величину $\Delta\alpha = \alpha_{тр}$, остановившись в положении $\alpha'_1 < \alpha_1$, при котором

$$M_y = M_{тр}.$$

При уменьшении измеряемой величины, например от номинального значения прибора до значения x_1 , подвижная часть опять не дойдет до прежнего положения α_1 на величину $\Delta\alpha = \alpha_{тр}$ и остановится в положении α''_1 , при котором $M_y = M_{тр}$.

Момент трения и угол трения обычно малы, поэтому можно написать:

$$M_y = M'_y \alpha_{тр},$$

откуда

$$\alpha_{тр} = \frac{M_y}{M'_y} = \frac{M_{тр}}{M'_y}. \quad (3-15)$$

Приведенная погрешность от трения

$$\gamma_{тр} = \frac{\alpha_{тр}}{\alpha_n} = \frac{M_{тр}}{M'_y \alpha_n} = \frac{k_{тр} G^{1,5}}{M'_y \alpha_n}, \quad (3-16)$$

где α_n — номинальный угол поворота подвижной части.

Погрешность от трения зависит от момента трения, а следовательно, от веса подвижной части, от материала и качества обработки подпятников и кернов, от состояния трущихся поверхностей, а также от удельного устанавливающего момента.

Погрешность от трения является одной из наиболее существенных погрешностей прибора.

Механические качества прибора, обусловленные его конструкцией (но не качеством изготовления и состоянием его), принято характеризовать величиной, называемой практическим коэффициентом добротности

$$A_d = 10 \frac{M_{90^\circ}}{G^{1,5}}, \quad (3-17)$$

В этом выражении числитель представляет собой момент пружины при закручивании ее на 90° , выраженный в грамм-сантиметрах, знаменатель — вес подвижной части в степени 1,5, выраженный в граммах; множитель 10 введен для того, чтобы для существующих приборов получить значения коэффициента добротности, близкие к единице.

Для электроизмерительных приборов различных систем с непосредственным отсчетом практический коэффициент добротности имеет значения 0,2—2.

3-6. ПОСТОЯННАЯ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРИБОРА

Определение измеряемой величины по прибору производится по углу поворота его подвижной части, так как из выражения (3-10) следует, что измеряемая величина

$$x = \frac{1}{S_x} \alpha = C_x \alpha. \quad (3-18)$$

У технических приборов и части лабораторных и образцовых приборов на шкалах наносятся отметки, по которым непосредственно устанавливается значение измеряемой величины — показание прибора. У некоторых лабораторных и образцовых приборов числа, стоящие у отметок шкал, указывают число делений или число миллиметров от нуля шкалы; на шкале не указывается,

какому значению измеряемой величины соответствует то или иное деление шкалы. В этих случаях показания прибора определяются путем умножения отсчета (числа, прочитанного у отметки шкалы) на постоянную прибора C_x . Постоянной прибора называется величина, на которую нужно умножить отсчет, выраженный в делениях или миллиметрах шкалы, чтобы получить показания прибора (3-7). Например, при отклонении указателя гальванометра на 8 мм шкалы при постоянной гальванометра по току $C_I = 1 \cdot 10^{-8}$ а/мм получим показание

$$I = C_I a = 1 \cdot 10^{-8} \cdot 8 = 8 \cdot 10^{-8} \text{ а.}$$

Постоянная прибора

$$C_x = \frac{x}{a} \quad (3-19)$$

численно равна измеряемой величине, соответствующей перемещению указателя на одно деление или на 1 мм шкалы прибора.

Величина, обратная постоянной прибора,

$$S_x = \frac{1}{C_x} = \frac{a}{x} \quad (3-20)$$

называется чувствительностью прибора. Она численно равна линейному или угловому перемещению указателя, соответствующему единице измеряемой величины. Например, чувствительность гальванометра к току $S_I = 1 \cdot 10^8$ мм/а или чувствительность амперметра к току $S_I = 20$ дел/а.

У приборов с равномерной шкалой чувствительность постоянна по всей длине шкалы.

В более общем случае, при более сложной зависимости между углом поворота подвижной части и измеряемой величиной, чувствительность определяется как предел отношения приращения перемещения указателя к соответствующему приращению измеряемой величины, т. е.

$$S_x = \left| \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta a}{\Delta x} \right| = \frac{da}{dx}. \quad (3-21)$$

3-7. ОТСЧЕТНОЕ УСТРОЙСТВО

Шкалой прибора называется поверхность с нанесенными на ней отметками, по которым определяется показание прибора.

Технические приборы имеют обычную шкалу и копьевидную стрелку (рис. 3-5).

Приборы высших классов точности снабжаются зеркальной шкалой и ножевидной стрелкой (рис. 3-10).

В этом случае в шкале вырезается дугообразная полоса шириной около 0,5 см, а с нижней стороны укрепляется зеркало, в котором отражается стрелка. Отсчет производится при том положении глаза, при котором стрелка закрывает свое изображение в зеркале.

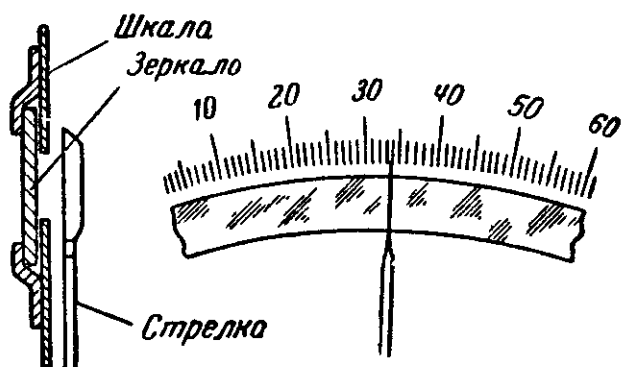


Рис 3-10. Зеркальная шкала и ножевидная стрелка.

Шкалы приборов бывают равномерными или пропорциональными (рис. 3-1) и неравномерными (рис. 3-2). Равномерной шкалой называется такая шкала, у которой расстояния между двумя любыми смежными отметками равны.

У приборов с малым вращающимся моментом применяется световой указатель (рис. 3-11).

Световой луч от лампы *a*, пройдя оптическую систему *б* и диафрагму *в*, после отражения в зеркале *г* подвижной части прибора попадает на шкалу *д*, давая на ней изображение светового пятна, на фоне которого резко вырисовывается тень копьевидной стрелки, укрепленной в отверстии диафрагмы. Поворот подвижной части вызывает соответствующее перемещение по шкале «теневого стрелки». Все оптическое устройство помещается в корпусе прибора.

В некоторых приборах применяется проектирование на шкалу четкой теневой линии вместо стрелки и многократное отражение луча, что равносильно удлинению стрелки до 1—1,5 м.

За последние годы начинают находить применение приборы с цифровым отсчетом — цифровые приборы, в которых измеряемая величина при непрерывном изменении оценивается дискретной величиной, т. е. такой, между отдельными значениями которой заключено ко-

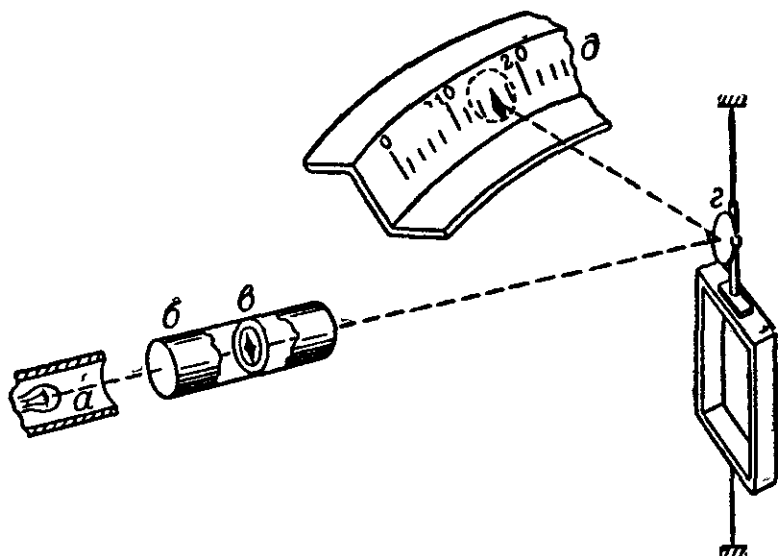


Рис. 3-11. Устройство внутреннего светового указателя.

нечное число других ее значений. Отсчет показания производится непосредственно на экране прибора в виде числа с определенным количеством значащих цифр.

3-8. УСПОКОЕНИЕ

Время колебания стрелки вокруг положения равновесия после включения прибора в цепь должно быть по возможности малым, для того чтобы можно было возможно быстрее произвести отсчет по шкале прибора. Временем успокоения прибора называется промежуток времени от момента включения прибора до момента, при котором амплитуда колебания стрелки будет не более 1% длины шкалы. Согласно ГОСТ это время должно быть не более 4 сек для приборов всех классов.

Все измерительные приборы снабжаются приспособлениями для успокоения колебаний подвижной части.

Применяются главным образом воздушные или магнитоиндукционные успокоители (рис. 3-12 и 3-13).

Воздушный успокоитель (рис. 3-12) состоит из закрытой камеры, внутри которой может перемещаться

легкое крыло, связанное с подвижной частью прибора. При вращении подвижной части в камере по одну сторону крыла получается сжатие, по другую — разрежение

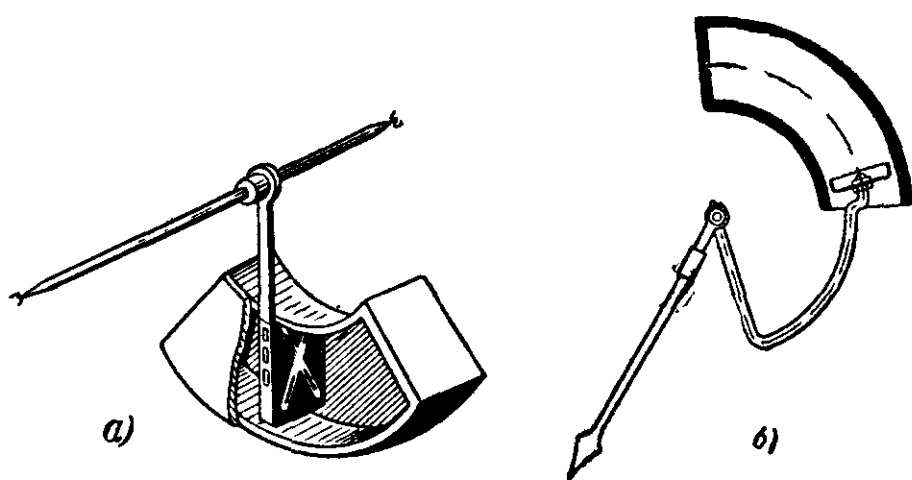


Рис. 3-12. Воздушные успокоители.

воздуха. Разность давлений, направленная против движения крыла, пропорциональная скорости движения, оказывает тормозящее (успокаивающее) действие на колебание подвижной части прибора.

Несколько иная (поршневая) конструкция воздушного успокоителя, широко применявшаяся ранее, дана на рис. 3-12, б.

Магнитоиндукционный успокоитель (рис. 3-13) состоит из алюминиевого листочка *a*, закрепленного на оси прибора *б* и могущего перемещаться в магнитном поле постоянного магнита. При движении подвижной части в листочке будут индуцироваться вихревые токи. От взаимодействия этих токов с полем магнита (по закону Ленца) будет создаваться тормозящее усилие, успокаивающее колебания подвижной части прибора.

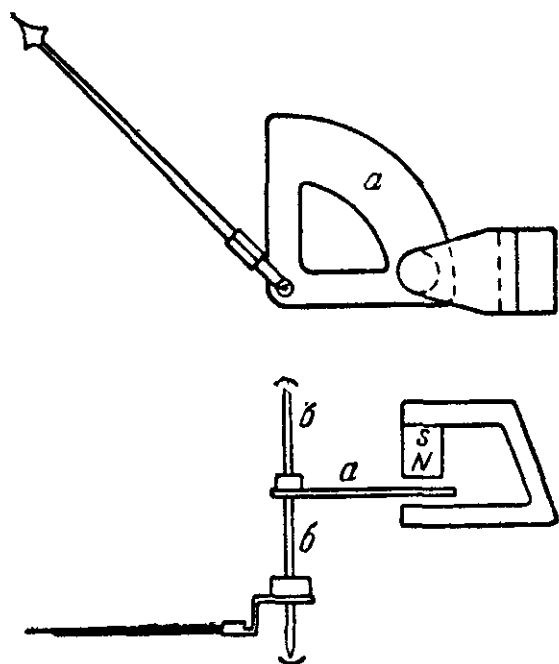


Рис. 3-13. Магнитоиндукционный успокоитель.

3-9. ПОГРЕШНОСТИ ПРИБОРОВ

Показание любого измерительного прибора вследствие непостоянства параметров измерительной цепи и несовершенства конструкции измерительного механизма всегда несколько отличается от действительного значения измеряемой величины, другими словами, всякий прибор имеет погрешность.

Погрешности электроизмерительных приборов разделяются на две категории:

I. Основная погрешность (см. § 1-2), характеризующая прибор как таковой и зависящая только от внутренних свойств и состояния самого прибора. Эта погрешность состоит из ряда составляющих погрешностей: 1) погрешность от трения; 2) погрешность от опрокидывания; 3) погрешность от неуравновешенности; 4) погрешность от неправильной градуировки и установки шкалы; 5) погрешности от остаточной деформации пружин, неправильного отсчета и др.

Выше, в § 1-3, было указано, что ГОСТ 1845-59 для электроизмерительных приборов установлены 8 классов точности.

II. Дополнительные погрешности (см. § 1-2), обусловленные влиянием внешних факторов и отклонением условий эксплуатации прибора от нормальных, также нормируются ГОСТ 1845-59.

Приведенные допустимые дополнительные погрешности (изменения показаний прибора), вызванные отклонением температуры окружающего воздуха на $\pm 10^\circ \text{C}$ от нормальной (см. § 1-2) в пределах рабочих температур (см. § 3-1), для приборов группы А установлены равными основной погрешности соответствующего класса точности. Например, для прибора группы А, класса точности 0,5 приведенная допустимая дополнительная погрешность от температуры, так же как и основная погрешность, составляет $\pm 0,5\%$, а для прибора той же группы класса точности 2,5 составляет соответственно $\pm 2,5\%$.

Для приборов групп Б и В ГОСТ установлены меньшие, чем для группы А, приведенные допустимые погрешности от температуры. Так, например, для приборов класса точности 0,5 группы Б приведенная допустимая

погрешность от температуры установлена в размере $\pm 0,4\%$, а для приборов группы В — $\pm 0,3\%$.

Приведенные допустимые дополнительные погрешности приборов групп А, Б и В, вызванные: а) определенным отклонением прибора от рабочего нормального положения; б) отклонением частоты $\pm 10\%$ от номинальной; в) отклонением напряжения на $\pm 10\%$ от номинального, для логометров установлены равными основной погрешности.

Внешние магнитные и электрические поля, накладываясь на собственные поля измерительных приборов, могут оказывать влияние на показания приборов. Это влияние тем больше, чем слабее собственное поле прибора и чем сильнее внешнее поле. Кроме того, большему влиянию подвержены измерительные приборы, не имеющие защитных экранов.

Изменение показаний приборов постоянного тока при самом неблагоприятном направлении магнитного поля напряженностью 400 а/м не должно превышать значений, указанных в табл. 3-3.

Таблица 3-3

Класс точности прибора	Допускаемое изменение показаний прибора, %			
	При воздействии внешнего магнитного или электрического поля		При воздействии ферромагнитного щита или рядом расположенного прибора	
	Категория I	Категория II	Категория I	Категория II
0,05; 0,1; 0,2; 0,5;	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$	$\pm 0,25$	$\pm 0,5$
1,0; 1,5	$\pm 1,0$	$\pm 2,5$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
2,5; 4,0	$\pm 2,5$	$\pm 5,0$	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$

Эта таблица определяет также изменение показаний приборов переменного тока с частотой до $1\,000 \text{ гц}$ (для всех систем, кроме выпрямительной и электронной) под влиянием однородного магнитного поля напряженностью 400 а/м , синусоидально изменяющегося с частотой, одинаковой с частотой тока, протекающего по обмотке прибора при самых неблагоприятных фазе и направлении поля.

Приборы переменного тока с магнитоэлектрическим измерительным механизмом должны удовлетворять вы-

шеуказанным требованиям при испытании в переменном и постоянном магнитных полях.

Изменение показаний прибора с электростатическим измерительным механизмом при частоте 50 гц под влиянием внешнего электрического поля той же частоты, при самых неблагоприятных фазе и направлении поля не должно превышать значений, указанных в табл. 3-3.

Напряженность E электрического поля в киловольт-метрах на метр для приборов с пределами напряжения до 40 кв должна определяться по формуле

$$E = 10 + U,$$

где U — номинальное напряжение испытуемого прибора, кв.

Для приборов с пределами измерений более 40 кв

$$E = 50 \text{ кв/м.}$$

При монтаже щитовых приборов на щите из ферромагнитного материала толщиной 3 мм и установке переносных приборов на ферромагнитном основании толщиной 3 мм изменение их показаний не должно превышать значений, указанных в табл. 3-3. Дополнительная погрешность прибора с магнитоэлектрическим измерительным механизмом под влиянием помещенного вплотную с ним такого же прибора, до этого находившегося на расстоянии не менее 1 м, указана в той же таблице для различных классов точности.

3-10. УСТОЙЧИВОСТЬ К ПЕРЕГРУЗКЕ

ГОСТ 1845-59 определяет устойчивость приборов к термической перегрузке — длительная нагрузка прибором током, превышающим номинальный, и к динамической перегрузке — импульсная нагрузка током, в несколько раз превышающим номинальный (подробнее см. ГОСТ 1845-59, Стандартгиз, Москва, 1959).

3-11. МОЩНОСТЬ ПОТЕРЬ

При работе измерительного прибора в нем расходуется электрическая энергия. Одна часть ее идет на нагревание его электрической цепи, другая — на вихревые токи и перемагничивание стали магнитопровода и сердечника.

Во многих случаях эта мощность потерь мала и не

имеет существенного значения с точки зрения экономии электрической энергии. Но с точки зрения повышения температуры отдельных частей прибора и связанных с этим погрешностей всегда желательно иметь прибор с меньшей мощностью потерь. Кроме того, как мощность потерь прибора, так и его параметры должны быть такими, чтобы включение прибора в цепь не вносило существенных изменений в режим работы цепи, в которой производится измерение, и тем самым не вносило бы погрешностей в измерение. Последнее особенно важно иметь в виду при измерениях в цепях с маломощными источниками энергии и потребителями.

Мощность потерь амперметра

$$P_A = I^2 r_A \quad (3-22)$$

Таблица 3-4

Ориентировочные значения мощности потерь приборов различных систем

Приборы	Мощность выражения, <i>вт(ва)</i>	
	амперметров и последовательных обмоток ваттметров при силе тока 5 а	вольтметров и параллельных цепей при напряжении 100 в
Амперметры магнитоэлектрические } " выпрямительные }	0,2—0,5	—
Амперметры термоэлектрические	1—2,0	—
" электромагнитные	1—2,5	—
" электродинамические	3,5—10	—
" индукционные	4—7,5	—
" тепловые	2—2,5	—
Вольтметры магнитоэлектрические } " выпрямительные }	—	0,1—1
Вольтметры электромагнитные	—	2—5
" электродинамические	—	3—9
" индукционные	—	5—10
" тепловые	—	8—15
Ваттметры электродинамические	1,5—5	3—5
" индукционные	2—5	3—6
Фазометры электродинамические	3—4	5—8
Счетчики индукционные	1—2,5	1—4

будет тем меньше, чем меньше активное сопротивление амперметра.

Мощность потерь вольтметра

$$P_V = \frac{U^2}{r_V}, \quad (3-23)$$

наоборот, будет тем меньше, чем больше его сопротивление.

Мощность потерь приборов при работе зависит от значений токов и напряжений и от системы прибора. В табл. 3-4 даны ориентировочные значения мощности потерь приборов различных систем.

3-12. ПРОЧНОСТЬ ИЗОЛЯЦИИ

Изоляция между электрически изолированными частями и корпусом прибора или вспомогательной части должна выдерживать в течение 1 мин действие испытательного напряжения синусоидальной формы и частоты 50 гц. Величина этого напряжения зависит от номинального напряжения прибора, вспомогательной части, а также от напряжения установки, для работы в которой

Таблица 3-5

Номинальное напряжение прибора или номинальное напряжение сети U	Действующее значение испытательного напряжения, кв		Примечание
	При нормальной влажности	При повышенной влажности (приборы группы В)	
До 40 в	0,5	0,5	—
Свыше 40 в до 650 в .	2,0	1,5	
„ 650 в до 1 000 в .	3,0	2,0	
„ 1 кв до 2 кв . . .	5,0	3,5	
Свыше 2 до 7 кв . . .	$2U+1$	$1,5U+0,5$	С округлением до целого числа вольт в сторону увеличения
„ 7 до 27 кв	$2U+1-0,02U^2$	$1,5U+0,5-0,1U^2$	
„ 27 кв	$1,5U$	$1,25U$	
Для приборов, предназначенных для включения через измерительные трансформаторы	2	1,5	—

прибор предназначен. Приборы группы В, кроме того, испытываются при повышенной влажности (см. табл. 3-5).

Требования к прочности изоляции различных приборов и вспомогательных частей к ним, величины сопротивлений изоляции приборов изложены в ГОСТ 1845-59.

Глава четвертая

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРИБОРОВ

4-1. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В магнитоэлектрических измерительных механизмах перемещение подвижной части происходит вследствие взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и тока, проходящего по катушке.

Измерительный механизм магнитоэлектрической системы, изображенной на рис. 4-1, состоит из постоянного магнита, магнитопровода и подвижной части.

Подвижной частью механизма является катушка (рамка) p , к которой прикреплены две пластины с полюсами-кернами, установленными в опорах. На одной из полюсней укрепляются внутренние концы спиральных пружин, втулка с указательной стрелкой и противовесами. Обмотка рамки выполняется из медной проволоки ($d=0,02—0,2$ мм) и обычно накладывается на каркас.

Рамка p расположена в узком воздушном зазоре, образованном полюсными башмаками $N'S'$, которые concentрично охватывают неподвижный стальной цилиндр a . Магнитное поле создается сильным постоянным магнитом NS . Силовые линии магнитного поля, замыкаясь через полюсные наконечники и сердечник, образуют в зазоре однородное, радиально направленное маг-

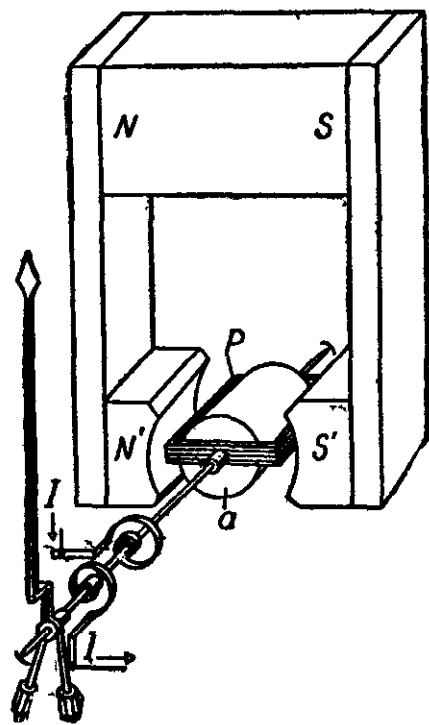


Рис. 4-1. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы.

нитное поле. Постоянный магнит NS изготавливается из высококачественных никельалюминийкобальтовых сталей (альни, альнико, магнико) с большой удельной магнитной энергией и позволяет получить в зазоре индукцию порядка 2 000—3 000 гс. Остальные части магнитной

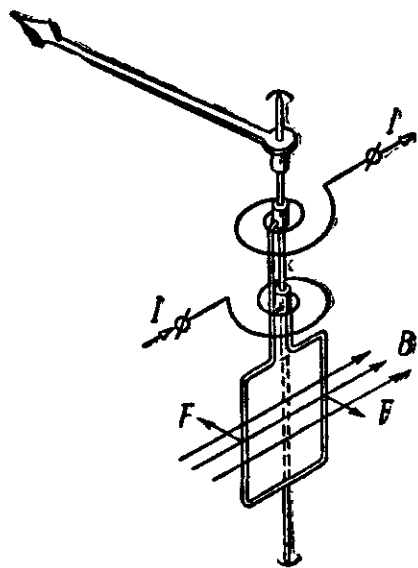


Рис. 4-2. Путь тока в измерительном механизме магнитоэлектрической системы.

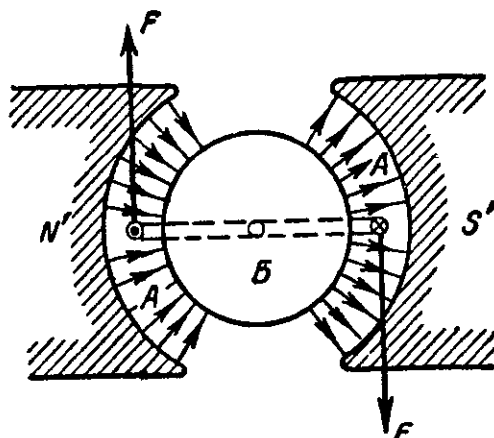


Рис. 4-3. Взаимодействие между током и магнитным полем.

нялись удлиненные постоянные магниты, изготовлявшиеся из хромистых сталей.

Измеряемый ток или ток, являющийся функцией измеряемой величины, от одного зажима прибора проходит через спиральную пружину, обмотку рамки, вторую пружину ко второму зажиму прибора (рис. 4-2).

Описанный измерительный механизм является механизмом с подвижной катушкой.

При протекании по обмотке рамки постоянного тока между ним и магнитным полем возникает механическое взаимодействие (рис. 4-2 и 4-3).

Под влиянием сил F , направленных под прямым углом к вектору магнитной индукции B , подвижная часть стремится повернуться на некоторый угол.

Сила, действующая на каждую активную сторону рамки,

$$F = IBlw,$$

а вращающий момент, действующий на подвижную часть,

$$M = 2F \frac{b}{2} = IBlb\omega = IBS\omega, \quad (4-1)$$

где I — ток в рамке;

B — магнитная индукция в зазоре;

l — активная длина одной стороны рамки;

b — ширина рамки;

ω — число витков рамки;

$S = bl$ — активная площадь рамки.

Установившееся положение подвижной части определяется равенством моментов

$$M = M_{\text{пр}} \text{ или } IBS\omega = D\alpha,$$

откуда угол поворота подвижной части измерительного механизма

$$\alpha = \frac{BS\omega}{D} I = S_I I, \quad (4-2)$$

т. е. он пропорционален току (равномерная шкала).

Ток в рамке

$$I = \frac{1}{S_I} \alpha = C_I \alpha, \quad (4-3)$$

где $S_I = \frac{\alpha}{I} = \frac{BS\omega}{D}$ — чувствительность измерительного механизма к току.

$$C_I = \frac{1}{S_I} = \frac{I}{\alpha} \text{ — постоянная по току.}$$

При токе I в рамке измерительного механизма на зажимах создается напряжение

$$U = Ir = C_I \alpha r = C_U \alpha. \quad (4-4)$$

Следовательно, по углу поворота подвижной части можно определить напряжение на зажимах измерительного механизма; иначе говоря, он может быть использован для измерения напряжения.

Постоянная по напряжению равна постоянной по току, умноженной на сопротивление рамки измерительного механизма, т. е.

$$C_U = \frac{U}{\alpha} = C_I r. \quad (4-5)$$

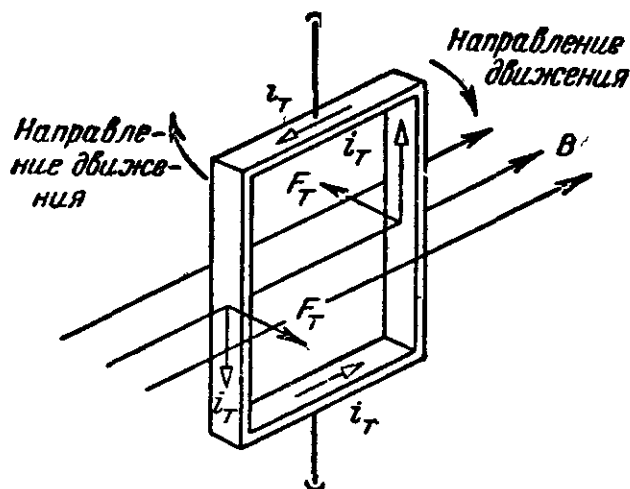


Рис 4-4. Получение тормозного момента.

Успокоителем измерительного механизма магнитоэлектрической системы является алюминиевый каркас рамки. При всяком движении подвижной части изменяется магнитный поток, пронизывающий каркас (рис. 4-4), и в нем наводится э. д. с. Эта э. д. с. вызовет в каркасе ток i_T , взаимодействие которого с магнитным полем

постоянного магнита создает тормозной момент, обеспечивающий быстрое успокоение.

Если через измерительный механизм магнитоэлектрической системы проходит переменный ток

$$i = I_m \sin \omega t,$$

то вращающий момент

$$M = BiS\omega = BI_m S\omega \sin \omega t = M_m \sin \omega t$$

будет изменяться пропорционально току.

Благодаря значительному моменту инерции J подвижной части и значительному периоду собственных колебаний угол отклонения подвижной части при нормальной технической частоте (50 гц) будет определяться средним за период тока значением вращающего момента

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{T} \int_0^T M_m \sin \omega t dt = 0,$$

т. е. при синусоидальном токе среднее значение вращающего момента равно нулю и, следовательно, угол отклонения подвижной части также будет равен нулю.

Непосредственное применение в цепях переменного тока измерительного механизма магнитоэлектрической системы возможно в случаях:

1) если его подвижная часть выполнена с малым моментом инерции и собственным периодом колебаний, равным или меньшим периода измеряемого тока (вибрационные гальванометры, магнитоэлектрические вибраторы осциллографов);

2) если измерительный механизм магнитоэлектрической системы применять совместно с выпрямительным устройством или термопреобразователем (детекторные, электронные и термоэлектрические приборы).

Кроме рассмотренного измерительного механизма с подвижной катушкой, широкое распространение получили магнитоэлектрические механизмы с внутрирамочным магнитом, в которых лучше используется энергия магнита, и они успешно применяются в миниатюрных приборах с диаметром корпуса 40 мм и меньше.

В измерительном механизме с внутрирамочным магнитом (рис. 4-5,а) рамка 1 поворачивается в воздушном зазоре под влиянием проходящего по ней тока. Магнитная цепь состоит из постоянного магнита 2, полюсных наконечников 3, служащих для получения однородного магнитного поля и ярма 4.

На рис. 4-5,б и в дано устройство измерительных механизмов с внутрирамочным магнитом. Рамка 1, помещенная в воздушном зазоре, укрепляется на растяжках 5. Магнит 2 изготавливается из никельалюминиевого сплава магнико с присадкой титана, кольцевое ярмо 4 — из сплава армко.

Такие измерительные механизмы применяются в стандартных гальванометрах со световым отсчетом и магнитоэлектрических приборах класса 0,1 и 0,2. Завод «Вибратор» изготавливает серию приборов с измерительным механизмом (рис. 4-5,в), размеры которого 50×25×80 мм и вес 50 г; вес подвижной части — 0,8 г. Для сравнения укажем, что вес механизма на кернах (приборы типа М104—М106) более 1 кг. При массовом производстве приборов завод имеет большую экономию материалов, особенно дорогостоящей магнитной стали и сплавов.

В механизмах с внутрирамочным магнитом магнитная цепь обеспечивает хорошую защиту от влияния внешних магнитных полей.

В современных приборах широко применяются также измерительные механизмы с углом отклонения подвиж-

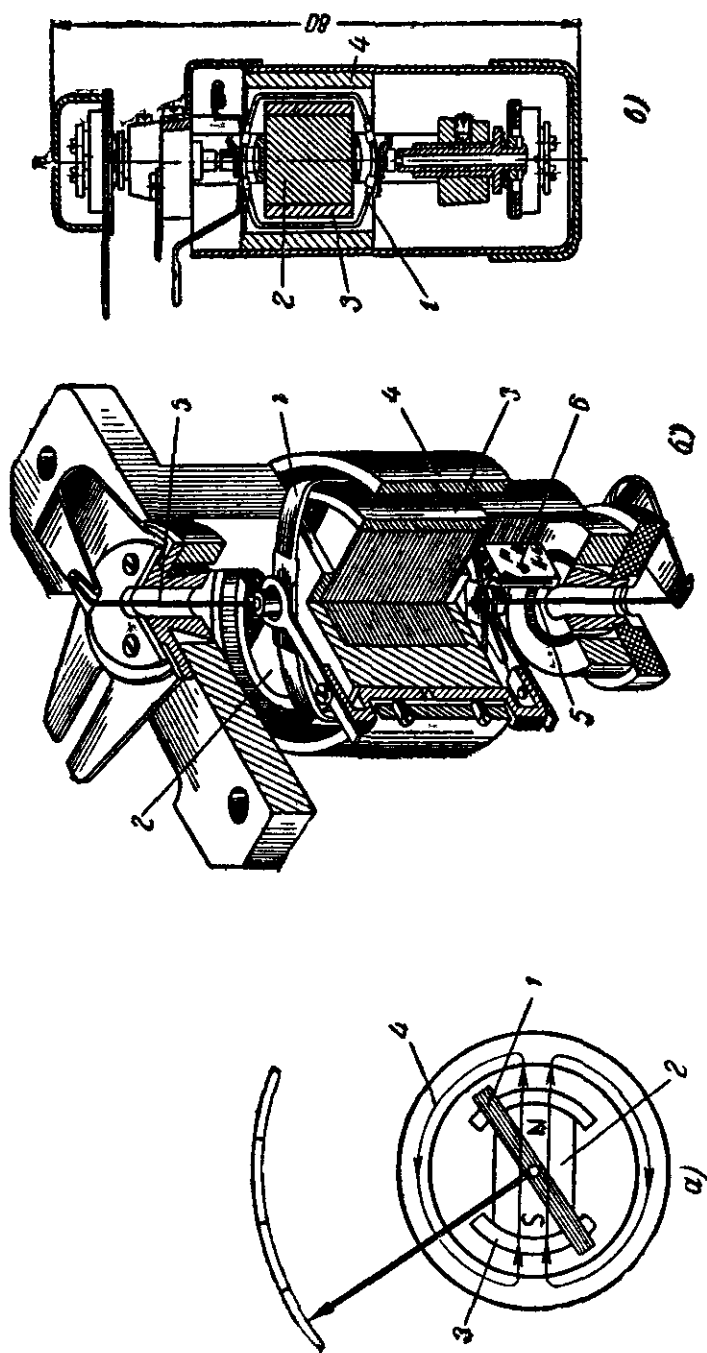


Рис. 4-5. Устройство магнитоэлектрического измерительного механизма с внутрирамочным магнитом.
а — схема устройства; *б* — механизм с внутренним световым отсчетом; *в* — механизм со стрелочным отсчетом.

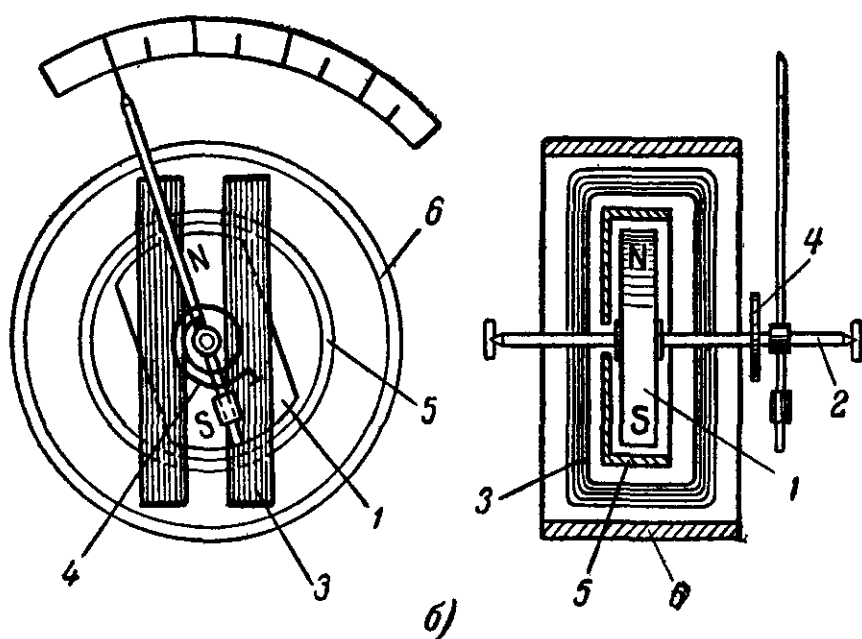
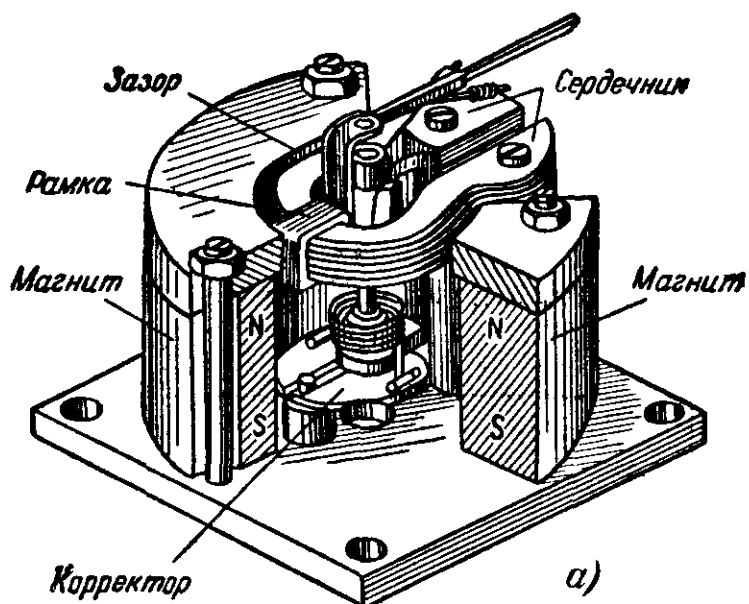


Рис. 4-6.

a — измерительный механизм с углом шкалы более 200° ; *б* — механизм с подвижным магнитом.

ной части более 200° и измерительные механизмы с подвижным магнитом (рис. 4-6). В механизмах первого типа рамка униполярная (рис. 4-6, *a*) — с одной активной стороной, расположенной в воздушном зазоре.

В измерительных механизмах с подвижным магнитом (рис. 4-6, *б*) магнит 1 укреплен на оси 2. Постоянный ток, протекающий по виткам катушки 3, создает магнитное поле.

Подвижный магнит, расположенный в магнитном поле катушки, стремится занять положение, при котором направления полей катушки и магнита будут совпадать. Успокоителем служит медный или алюминиевый стакан 5, в стенках которого при движении магнита наводятся токи, создающие тормозные силы. Для уменьшения влияния внешних магнитных полей на показания

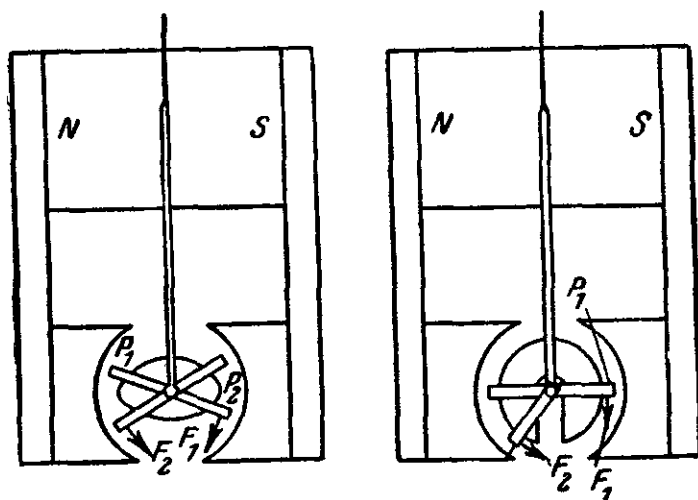


Рис 4-7. Варианты измерительного механизма логометра магнито-электрической системы.

прибора весь механизм заключают в экран 6 из пермаллоя. Такая конструкция измерительного механизма выгодно отличается простотой, но зато подвижная часть имеет относительно большой вес и значительный момент инерции.

Для логометров применяются механизмы магнито-электрической системы с двумя рамками.

На рис. 4-7 схематически показаны две разновидности такого измерительного механизма. Подвижная часть имеет две рамки p_1 и p_2 , укрепленные на одной оси с указательной стрелкой.

На рис. 4-7,а рамки одинаковы, на рис. 4-7,б одна рамка нормальная, другая малая (p_2).

Ток к подвижным рамкам подводится при помощи гибких ленточек (безмоментных подводов), практически не создающих противодействующих моментов, и, следовательно, при отсутствии вращающих моментов подвижная часть находится в положении безразличного равновесия.

Магнитная индукция в воздушном зазоре неодинакова в отдельных его точках, что достигается в одних случаях формой сердечника (рис. 4-7,а), в других — формой полюсных башмаков (рис. 4-7,б). Допустим, что магнитная индукция в том месте, в котором расположены активные провода первой рамки, выражена уравнением

$$B_1 = f_1(\alpha),$$

а в том месте, в котором находятся активные провода второй рамки,

$$B_2 = f_2(\alpha),$$

где α — угол поворота подвижной части, отсчитываемый от ее исходного положения, при котором стрелка прибора стоит на нуле шкалы.

При наличии в рамках токов I_1 и I_2 возникают два вращающих момента:

$$M_1 = I_1 B_1 S_1 \omega_1 = I_1 S_1 \omega_1 f_1(\alpha) = I_1 F_1(\alpha)$$

и

$$M_2 = I_2 B_2 S_2 \omega_2 = I_2 S_2 \omega_2 f_2(\alpha) = I_2 F_2(\alpha).$$

Так как вращающие моменты направлены в разные стороны, то под влиянием их разности подвижная часть будет поворачиваться; при этом больший вращающий момент будет убывать вследствие того, что соответствующая рамка будет перемещаться в менее интенсивную часть поля; в то же время меньший момент будет возрастать вследствие того, что соответствующая рамка будет перемещаться в более интенсивную часть поля.

При определенном положении рамок моменты взаимно уравновесятся.

Для этого положения равновесия подвижной части

$$M_1 = M_2$$

и, следовательно,

$$I_1 F_1(\alpha) = I_2 F_2(\alpha),$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{F_2(\alpha)}{F_1(\alpha)} = F_3(\alpha)$$

или

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right). \quad (4-6)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части определяется отношением токов в рамках.

Измерительные механизмы, угол поворота которых зависит от отношения токов, независимо от их системы называются л о г о м е т р а м и.

Наличие магнита, создающего в воздушном зазоре поле с значительной индукцией, обеспечивает возможность иметь измерительный механизм с высокой чувствительностью к току (до 5 дел/мкА), малой мощностью потерь, мало чувствительный к влиянию внешнего магнитного поля.

Температура оказывает незначительное влияние на зависимость между током в рамке и углом поворота подвижной части измерительного механизма, так как изменение модуля упругости материала пружин, вызванное изменением температуры, частично компенсируется изменением магнитной индукции в воздушном зазоре, вызванном изменением температуры магнита.

4-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СИСТЕМА

В электромагнитных измерительных механизмах перемещение подвижной части происходит вследствие взаимодействия магнитного поля измеряемого тока, проходящего по катушке, и одного или нескольких сердечников из ферромагнитного материала.

Измерительные механизмы электромагнитной системы выполняют с плоской катушкой (рис. 4-8) и с круглой катушкой (рис. 4-9).

В измерительных механизмах первого типа обмотки неподвижной катушки A (рис. 4-8) наматываются на каркас. На оси B укреплен сердечник B из стали или пермаллоя. На той же оси укреплены указательная стрелка с грузиками для уравнивания подвижной части, спиральная пружина и алюминиевый сектор Γ магнитоиндукционного успокоителя.

При прохождении по катушке постоянного тока создается магнитное поле и сердечник B намагничивается. Возникающая при этом сила взаимодействия F будет втягивать сердечник в катушку A , стремясь переместить его в положение, при котором запасенная в магнитном поле энергия $W_m = L \frac{I^2}{2}$ будет иметь наибольшее значение.

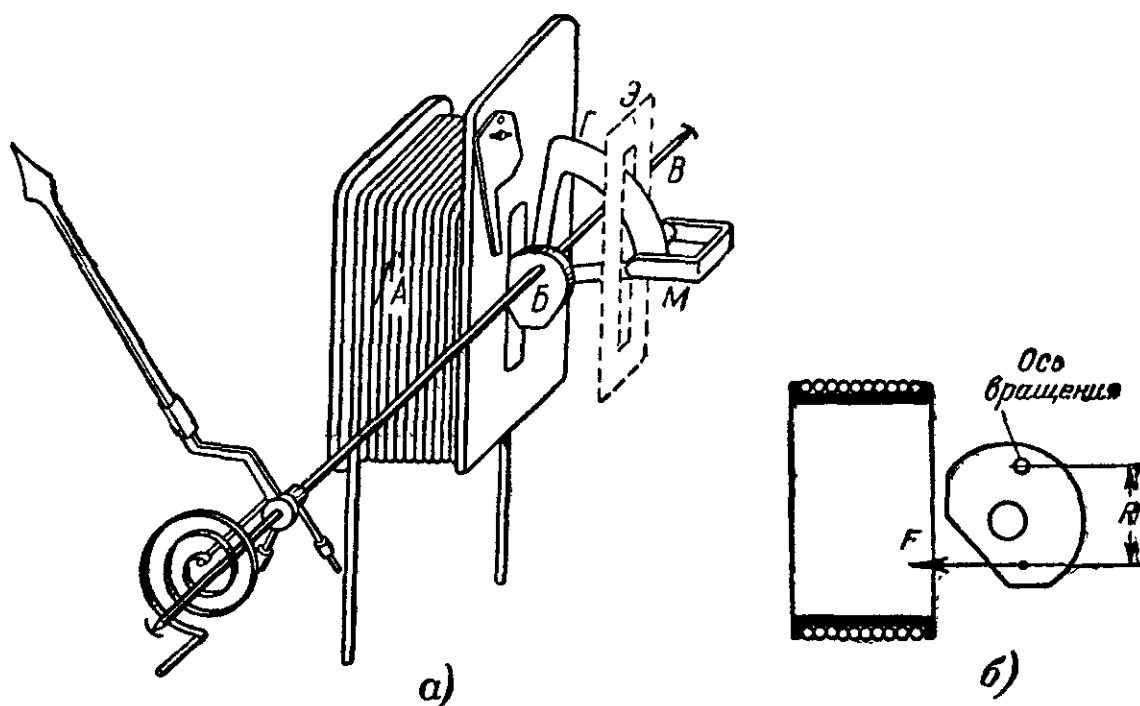


Рис. 4-8. Устройство электромагнитного амперметра с плоской катушкой.

а — внешний вид измерительного механизма; *б* — катушка и сердечник измерительного механизма.

Исходя из энергетического баланса, согласно которому механическая работа, произведенная при перемещении сердечника (при повороте подвижной части),

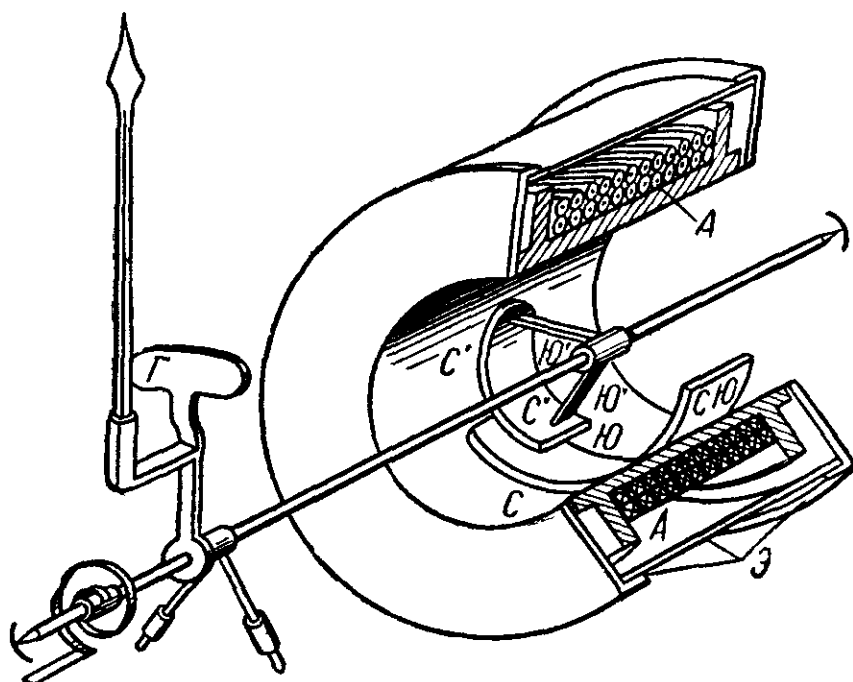


Рис. 4-9. Устройство электромагнитного измерительного механизма с круглой катушкой.

равна приращению энергии магнитного поля, можно написать:

$$F dl = dW_m.$$

Выражая расстояние dl , на которое перемещается точка приложения силы, как длину дуги радиуса R (рис. 4-8,б), получаем:

$$F dl = FR d\alpha = M d\alpha = dW_m,$$

откуда вращающий момент, действующий на подвижную часть,

$$M = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{I^2}{2} \cdot \frac{dL}{d\alpha}. \quad (4-7)$$

Величина $\frac{dL}{d\alpha}$ выражает скорость изменения индуктивности катушки при повороте сердечника.

При различных формах сердечника и различном взаимном расположении сердечника и катушки могут быть получены различные зависимости $\frac{dL}{d\alpha} = f(\alpha)$.

Считая в первом приближении $\frac{dL}{d\alpha}$ постоянной величиной, получаем:

$$M = k_1 I^2. \quad (4-8)$$

Вращающий момент вызывает поворот подвижной части на угол, при котором

$$M = M_{пр} = D \alpha,$$

откуда угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{k_1}{D} I^2 = k_2 I^2. \quad (4-9)$$

Если принять в первом приближении скорость изменения индуктивности при повороте сердечника $\frac{dL}{d\alpha}$ постоянной, мы получим угол отклонения подвижной части пропорциональным квадрату тока, откуда следует, что шкала прибора будет квадратичной, сжатая в начале и растянутая в конце.

Выбор формы сердечника позволяет изменить величину $\frac{dL}{d\alpha}$, чтобы при малых токах этот множитель увеличивал, а при больших токах уменьшал вращающий момент, чем и достигается получение шкалы, близкой к равномерной в ее рабочей части с 15—20% от верхнего предела измерения.

При прохождении по катушке переменного тока одновременно изменяются направление магнитного потока и полярность сердечника. Знак вращающего момента остается тот же, что подтверждается формулой (4-7), в которую измеряемая величина входит в квадрате. Мгновенное значение вращающего момента

$$M = k_1 i^2.$$

Среднее за период тока значение вращающего момента равно:

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{T} \int_0^T k_1 i^2 dt = k_1 I^2,$$

где $I^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt$ — квадрат действующего значения тока.

Вследствие значительного момента инерции подвижной части угол поворота ее будет определяться значением $M_{\text{ср}}$ и, следовательно, пропорционален квадрату действующего значения тока

$$\alpha = k_2 I^2.$$

Измерительный механизм с круглой катушкой (рис. 4-9) состоит из неподвижной круглой катушки А, внутри которой укреплен неподвижный сердечник из магнитно-мягкой стали СЮ. Второй сердечник С'Ю' укреплен на оси.

На той же оси укрепляются указательная стрелка, спиральная пружина, алюминиевый сектор Г магнитоиндукционного успокоителя и противовес для уравнивания подвижной части.

Катушка окружена стальным (магнитным) экраном Э. Так как относительная магнитная проницаемость стали значительно больше, чем у воздуха, то магнитная

индукция в части пространства, заключенной внутри экрана, обусловленная наличием внешнего магнитного поля, будет значительно меньше, чем вне его.

При прохождении по катушке тока сердечники намагничиваются одноименно и отталкиваются, т. е. на

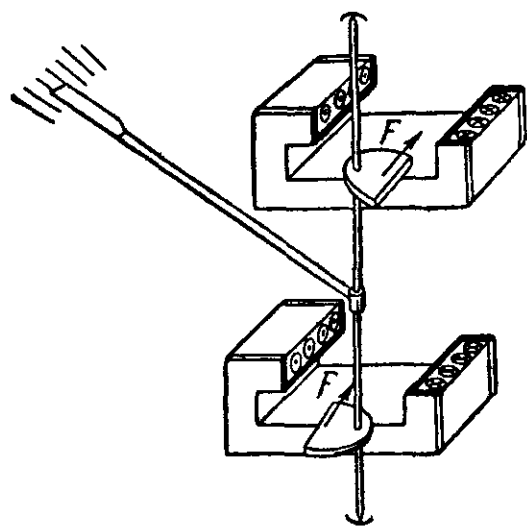


Рис. 4-10. Измерительный механизм логометра электромагнитной системы.

подвижный сердечник будут действовать силы, создающие вращающий момент.

Все сказанное о зависимости между углом поворота подвижной части и величиной измеряемого тока для измерительного механизма с плоской катушкой целиком относится к механизмам с круглой катушкой.

В приборах для измерения частоты, емкости и угла сдвига фаз применяются электромагнитные логометры.

Электромагнитные логометры представляют собой измерительный механизм с двумя неподвижными катушками и соответственно с двумя сердечниками, укрепленными на одной оси со стрелкой (рис. 4-10).

Вращающий момент, действующий на каждый из сердечников, зависит от квадрата тока соответствующей катушки и угла поворота подвижной части, а знак момента — от знака производной $\frac{dL}{d\alpha}$. Если сердечники укрепить на оси так, чтобы при увеличении угла ($d\alpha > 0$) индуктивность одной из катушек увеличивалась ($dL > 0$), а другой уменьшалась ($dL < 0$), то вращающие моменты будут направлены в противоположные стороны.

При наличии токов в обмотках подвижная часть устанавливается в том положении, при котором моменты взаимно уравновешиваются, т. е. при

$$M_1 = M_2$$

или

$$I_1^2 f_1(\alpha) = I_2^2 f_2(\alpha),$$

откуда

$$\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f_3(\alpha),$$

или

$$\alpha = F\left(\frac{I_1^2}{I_2^2}\right). \quad (4-10)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части определяется отношением квадратов токов.

На постоянном токе у измерительного механизма электромагнитной системы вследствие влияния остаточной индукции (гистерезис) наблюдается разница в отклонениях подвижной части при возрастании и убывании тока, достигающая до 2—3% длины шкалы. Применение для сердечников специальных сплавов (пермаллой) с малой остаточной индукцией позволяет значительно уменьшить эту величину. На переменном токе в сердечнике и других металлических частях возникают вихревые токи, оказывающие размагничивающее действие на сердечник, и, следовательно, показания прибора на переменном токе будут немного меньше, чем на постоянном.

Однако при стандартной частоте (50 гц) влияние вихревых токов на показания измерительного механизма незначительно.

Шкала прибора обычно градуируется по среднему значению нарастающих и спадающих величин.

Так как вращающий момент электромагнитных измерительных механизмов зависит от напряженности магнитного поля ($H=Iw$), то естественно, что внешние магнитные поля вызывают дополнительную погрешность. Собственное магнитное поле прибора обладает небольшой напряженностью, и дополнительная погрешность от внешнего поля может быть значительной, что всегда следует иметь в виду при установке прибора и работе с ним.

Применение экранов из пермаллоя или из стали (рис. 4-9) ослабляет влияние внешних магнитных полей. В астатических измерительных механизмах (рис. 4-11) погрешность от влияния внешнего однородного магнитного поля почти полностью устранена. В таком механизме имеются две последовательно соединенные катуш-

ки и два сердечника, укрепленных на одной оси. При наличии в катушках измеряемого тока магнитные поля катушек направлены противоположно, а поворот подвижной части вызывается моментами одного направления. Внешнее однородное магнитное поле уменьшает

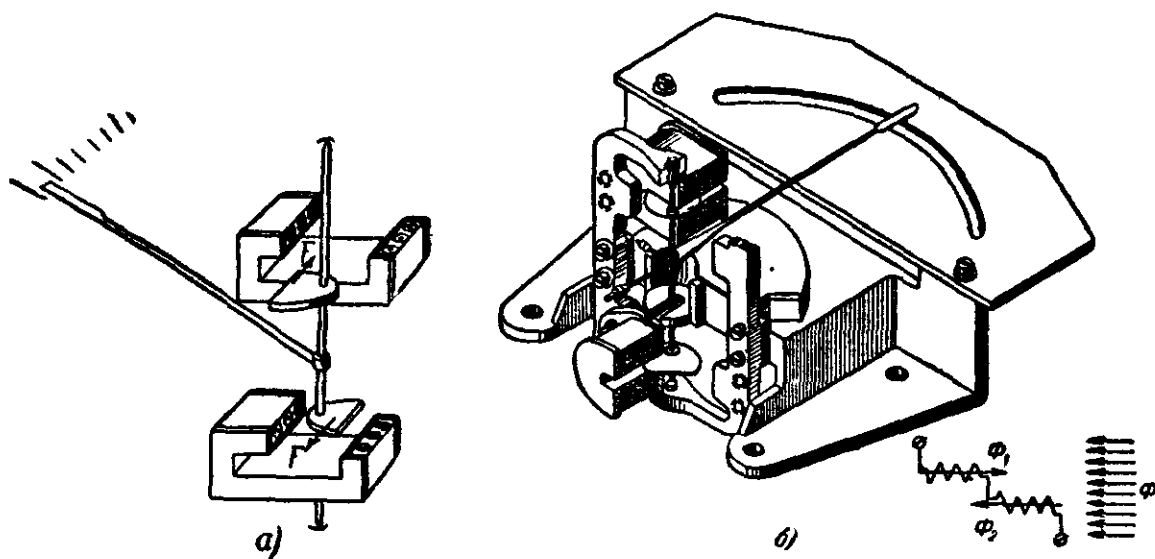


Рис 4-11 Схема и устройство астатического измерительного механизма электромагнитного прибора

вращающий момент, действующий на один сердечник, и настолько же увеличивает вращающий момент, действующий на второй сердечник.

4-3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В электродинамических измерительных механизмах перемещение подвижной части происходит вследствие электродинамического взаимодействия между токами, проходящими по неподвижной и подвижной катушкам.

Измерительный механизм электродинамической системы (рис. 4-12) состоит из двух катушек: неподвижной B и подвижной B . Неподвижная катушка часто делится на две части (рис. 4-13).

Подвижная катушка располагается внутри неподвижной на одной оси с указательной стрелкой, крылом воздушного успокоителя и двумя спиральными пружинами, служащими для подвода тока к подвижной катушке и создания противодействующего момента.

При прохождении по катушкам прибора постоянных

токов I_1 и I_2 возникает магнитное поле, в котором запасается энергия

$$W_m = \frac{L_1 I_1^2}{2} + \frac{L_2 I_2^2}{2} + M_{12} I_1 I_2,$$

где L_1 и L_2 — индуктивности катушек;

M_{12} — их взаимная индуктивность.

Взаимодействие токов, проходящих в катушках, приводит к получению вращающего момента, действующе-

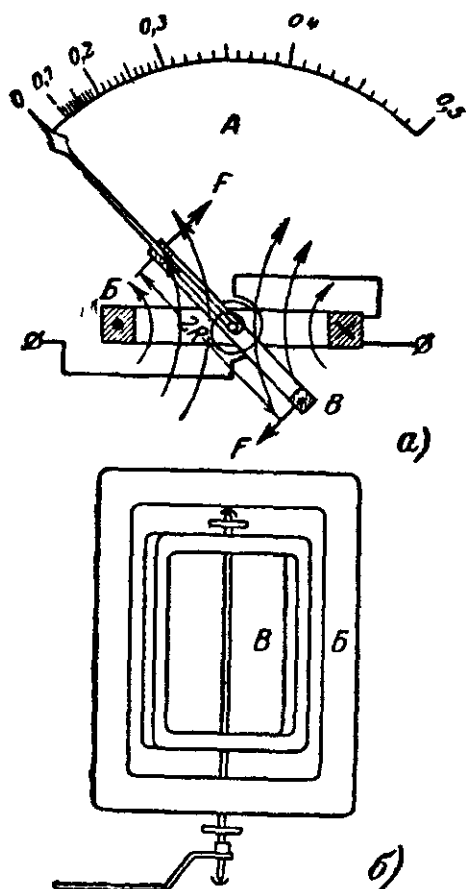


Рис. 4-12. Схема устройства измерительного механизма электродинамической системы.

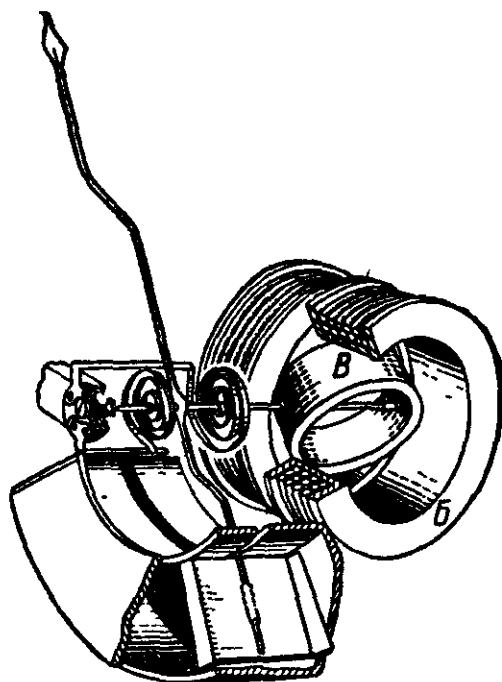


Рис. 4-13. Устройство измерительного механизма электродинамической системы.

го на подвижную катушку и стремящегося повернуть ее в положение, при котором энергия магнитного поля катушек будет наибольшей.

Вращающий момент см. формулу (4-7):

$$M = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{I_1^2}{2} \cdot \frac{dL_1}{d\alpha} + \frac{I_2^2}{2} \frac{dL_2}{d\alpha} + I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha},$$

где $d\alpha$ — угол поворота, при котором запас энергии поля получает приращение dW_m .

Так как L_1 и L_2 постоянны, то

$$M = I_1 I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (4-11)$$

Полученное выражение показывает, что в общем случае вращающий момент зависит не только от токов в катушках, но и от их взаимного расположения, так как величина $\frac{dM_{12}}{d\alpha}$ изменяется при изменении положения подвижной катушки; зависимость $\frac{dM_{12}}{d\alpha} = f(\alpha)$ определяется формой катушек и их взаимным расположением.

Приняв в первом приближении отношение $\frac{dM_{12}}{d\alpha} = k_1$ постоянным, получим:

$$M = k_1 I_1 I_2. \quad (4-12)$$

Этот вращающий момент будет вызывать поворот подвижной катушки до тех пор, пока он не уравнивается противодействующим моментом

$$M = M_{\text{пр}}$$

или

$$k_1 I_1 I_2 = D\alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_1}{D} I_1 I_2 = k_2 I_1 I_2. \quad (4-13)$$

Из написанного следует, что при допущенном упрощении как вращающий момент, так и угол поворота подвижной части пропорциональны произведению токов в катушках.

Если по катушкам измерительного механизма проходят токи i_1 и i_2 , сдвинутые между собой по фазе на угол ψ , т. е.

$$i_1 = I_{1m} \sin \omega t \text{ и } i_2 = I_{2m} \sin (\omega t - \psi),$$

то мгновенный вращающий момент

$$M = k_1 i_1 i_2 = k_1 I_{1m} \sin \omega t \cdot I_{2m} \sin (\omega t - \psi).$$

Среднее значение вращающего момента

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt =$$

$$= k_1 \frac{1}{T} I_{1m} I_{2m} \int_0^T \sin \omega t \cdot \sin (\omega t - \psi) dt = k_1 I_1 I_2 \cos \psi. \quad (4-14)$$

Для положения равновесия подвижной части

$$M_{\text{ср}} = M_{\text{пр}},$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_1}{D} I_1 I_2 \cos \psi = k_2 I_1 I_2 \cos \psi. \quad (4-15)$$

Таким образом, в цепи переменного тока при допущенном ранее упрощении как вращающий момент, так и угол поворота подвижной части измерительного меха-

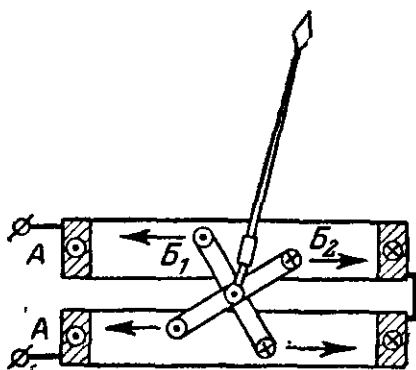


Рис. 4-14. Схема устройства измерительного механизма логометра электродинамической системы.

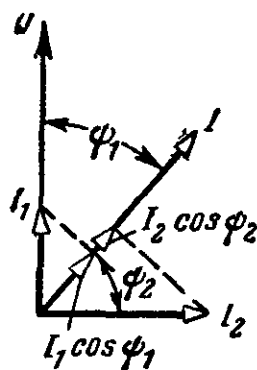


Рис. 4-15. Векторная диаграмма электродинамического логометра.

низма зависят от произведения действующих значений токов в катушках и косинуса угла сдвига фаз между ними.

Измерительные механизмы электродинамических логометров имеют различное устройство. На рис. 4-14 дана схема устройства одного из них. Он состоит из неподвижной катушки A и двух подвижных B1 и B2, расположенных внутри катушки A. Подвижные катушки

укреплены на одной оси с указательной стрелкой. Ток к подвижным катушкам подводится при помощи безмоментных подводов.

При наличии в катушке A тока I (рис. 4-15) и в катушках B_1 и B_2 токов I_1 и I_2 создаются два вращающих момента, направленные в разные стороны. Под влиянием разности этих моментов подвижная часть повернется на некоторый угол и займет положение, при котором вращающие моменты взаимно уравниваются.

Для этого положения подвижной части

$$M_1 = M_2$$

или

$$k_1 I I_1 \cos \psi_1 f_1(\alpha) = k_2 I I_2 \cos \psi_2 f_2(\alpha),$$

где ψ_1 — угол сдвига между токами I и I_1 ;

ψ_2 — угол сдвига между токами I и I_2 .

При $k_1 = k_2$ получим:

$$I_1 \cos \psi_1 f_1(\alpha) = I_2 \cos \psi_2 f_2(\alpha);$$

полученному выражению можно придать несколько иную форму:

$$\frac{I_2 \cos \psi_2}{I_1 \cos \psi_1} = \frac{f_1(\alpha)}{f_2(\alpha)} = f_3(\alpha)$$

или

$$\alpha = F \left(\frac{I_2 \cos \psi_2}{I_1 \cos \psi_1} \right). \quad (4-16)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части логометра определяется отношением слагающих токов в подвижных катушках, совпадающих по фазе с током в неподвижной катушке.

Отсутствие стали в измерительном механизме, а следовательно, и отсутствие влияния гистерезиса и вихревых токов на показания дают возможность изготавливать измерительные механизмы этой системы, обладающие высокой точностью.

С другой стороны, магнитное поле у этих измерительных механизмов является слабым и, следовательно, они в сильной степени подвержены влиянию внешних магнитных полей.

Для уменьшения дополнительной погрешности от внешнего магнитного поля применяются астатические

измерительные механизмы. Астатический механизм имеет две неподвижные и две подвижные катушки (рис. 4-16). Магнитные поля неподвижных катушек имеют противоположные направления. Токи в подвижных катушках также направлены взаимно противоположно. Таким образом, вращающие моменты, созданные токами в катушках имеют одинаковые направления. Благодаря различным направлениям токов в подвижных катушках увеличение вращающего момента одной подвижной катушки, вызванное внешним равномерным полем, компенсируется таким же уменьшением вращающего момента второй катушки, вызванным тем же внешним магнитным полем.

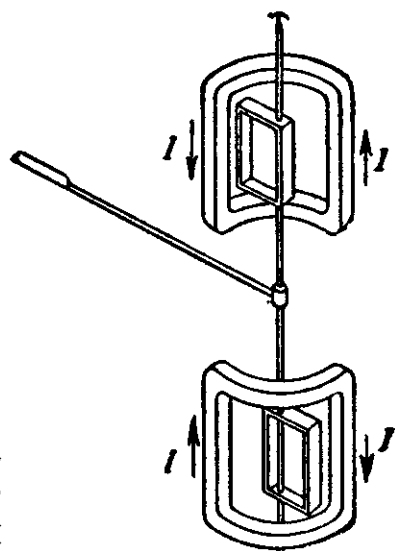


Рис 4-16. Устройство астатического измерительного механизма электродинамической системы.

Вторым средством уменьшения дополнительных погрешностей от внешнего магнитного поля является применение экранирования (рис. 4-17). Внешнее магнитное поле замыкается через экраны и практически не по-

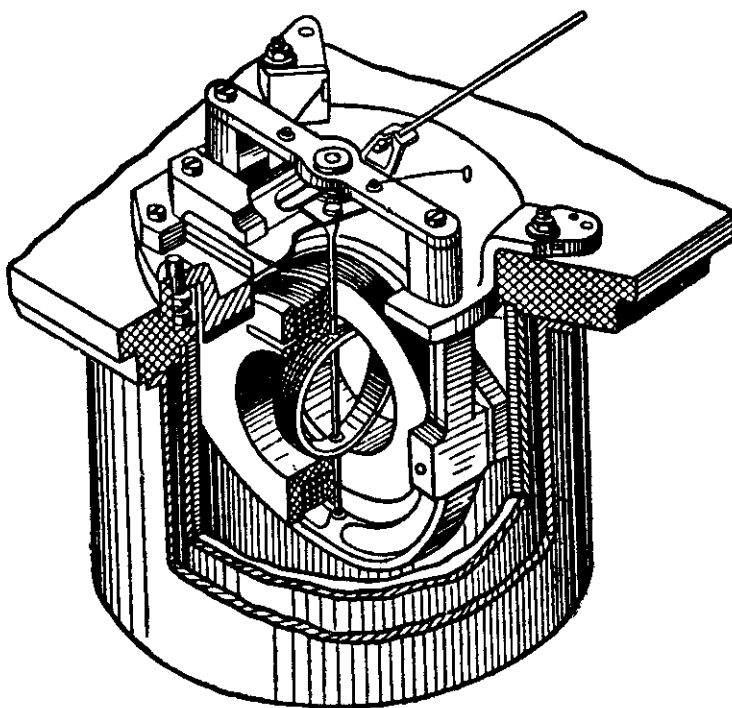


Рис. 4-17. Электродинамический механизм с двойным экраном.

дает в измерительный механизм. Для экранов лучше применять пермаллой, имеющий наибольшую магнитную проницаемость при малой напряженности поля, что соответствует условиям эксплуатации прибора.

Благодаря слабому магнитному полю электродинамические приборы обладают сравнительно небольшим вращающим моментом, а это обстоятельство при желании получить прибор высокого класса точности требует уменьшения погрешности от трения. Этой цели достигают разумным уменьшением веса подвижной части, самым тщательным подбором материалов для осей и подпятников и безупречной их обработкой.

Все это приводит к тому, что, с одной стороны, повышается стоимость прибора, с другой стороны, приборы получаются сравнительно чувствительными к перегрузкам и механическим воздействиям и, следовательно, требуют самого бережного и внимательного отношения и обслуживания.

4.4. ФЕРРОДИНАМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Ферродинамические измерительные механизмы впервые были предложены для применения и разработаны М. О. Доливо-Добровольским в 1913 г.

Представляя разновидность электродинамических измерительных механизмов, ферродинамические отличаются от них наличием магнитопровода из магнитно-мягкого материала.

На рис. 4-18 дана схема устройства одного из механизмов этой системы.

Неподвижная катушка из двух половин расположена на двух стержнях магнитопровода, выполненного из листовой стали. Вокруг цилиндрического сердечника в воздушном зазоре помещается подвижная катушка, укрепленная на одной оси со стрелкой. Подвижная катушка выполняется без металлического каркаса во избежание появления в нем индуктированных токов.

В воздушном зазоре образуется сильное равномерное

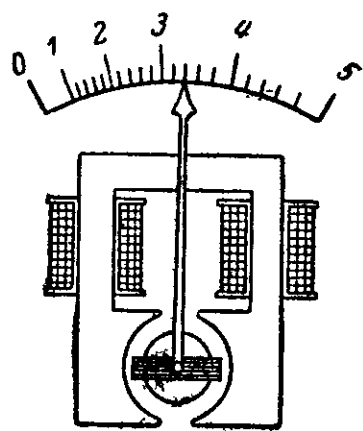


Рис. 4-18. Устройство измерительного механизма ферродинамической системы.

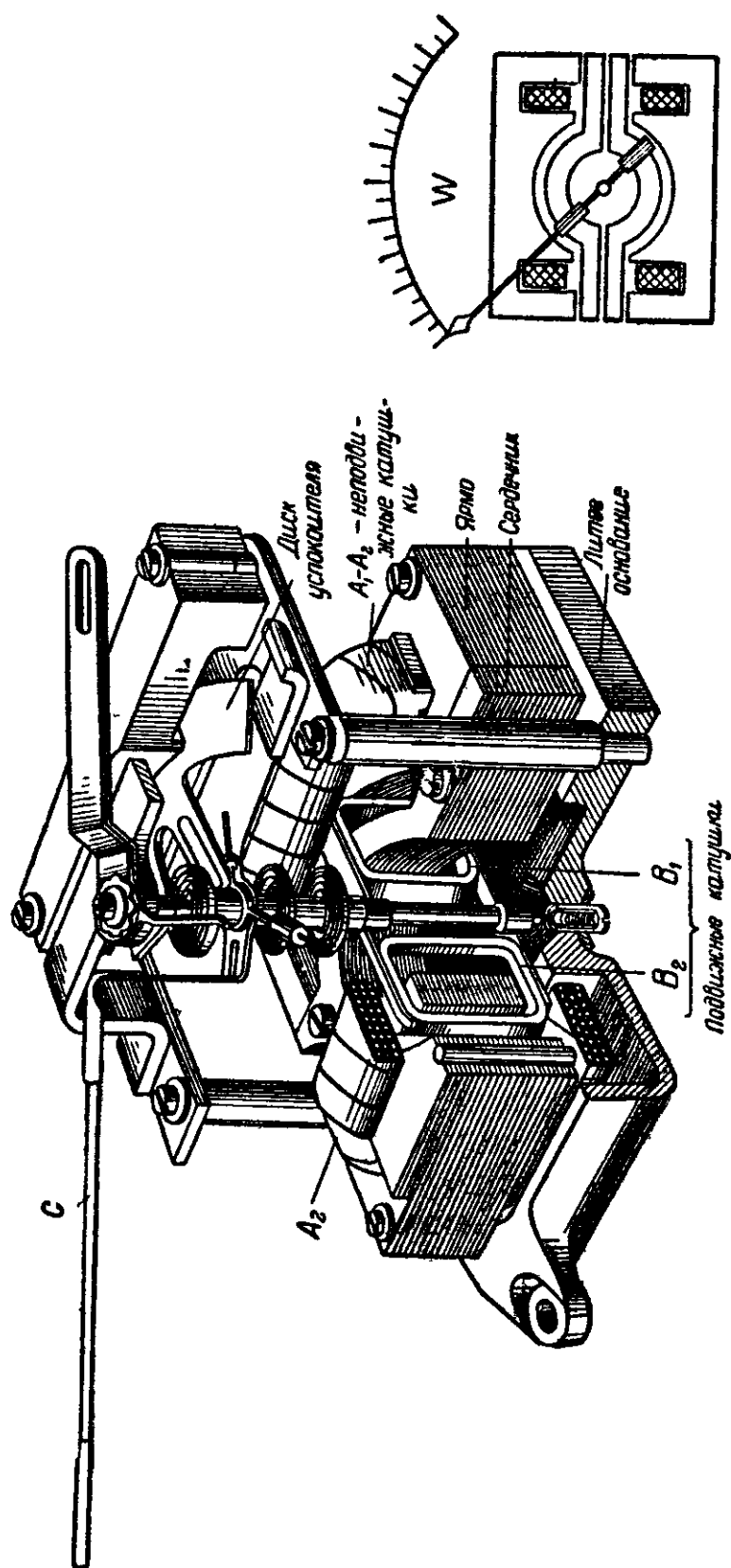


Рис. 4-19. Схема и устройство измерительного механизма ферродинамической системы с двумя элементами.

магнитное поле, индукция которого пропорциональна току неподвижной катушки.

Взаимодействие тока подвижной катушки с магнитным полем в воздушном зазоре создает вращающий момент, который, как и в электродинамическом измерительном механизме, пропорционален произведению действующих значений токов катушек и косинусу угла сдвига между ними.

Благодаря малому сопротивлению магнитной цепи в воздушном зазоре могут быть получены весьма значительная магнитная индукция, а следовательно, и большой вращающий момент.

Значительное увеличение вращающего момента по сравнению с электродинамическими механизмами дает возможность увеличить вес подвижной части без увеличения погрешности от трения и, следовательно, обеспечивает возможность получения прочной подвижной части.

Большая магнитная индукция в воздушном зазоре делает показания прибора практически независимым от внешних магнитных полей.

С другой стороны, применение стали влечет за собой появление составляющих основной погрешности от гистерезиса и вихревых токов.

На рис. 4-19 показано устройство измерительного механизма с двумя элементами, каждый из которых имеет неподвижную и подвижную катушки. Подвижные катушки укреплены на одной оси со стрелкой. Вращающий момент, действующий на подвижную часть, равен алгебраической сумме моментов, создаваемых отдельными элементами. На рис. 4-20 показано аналогичное устройство с тремя элементами.

На рис. 4-21 показана схема устройства одного из ферродинамических логометров. Он состоит из двух неподвижных катушек A_1 и A_2 и двух подвижных катушек B_1 и B_2 .

Подвижные катушки укреплены на одной оси с указательной стрелкой прибора.

Пружины для создания противодействующего момента отсутствуют. Катушки A_1 и B_1 соединены последовательно между собой; также соединены и катушки A_2 и B_2 . Взаимодействие катушек A_1 и B_1 при наличии в них

тока I_1 вызовет вращающий момент M_1 , действующий на катушку B_1 . Взаимодействие катушек A_2 и B_2 при прохождении по ним тока I_2 вызовет момент M_2 , действующий на катушку B_2 .

Под влиянием разности моментов подвижная часть логометра будет поворачиваться до тех пор, пока не

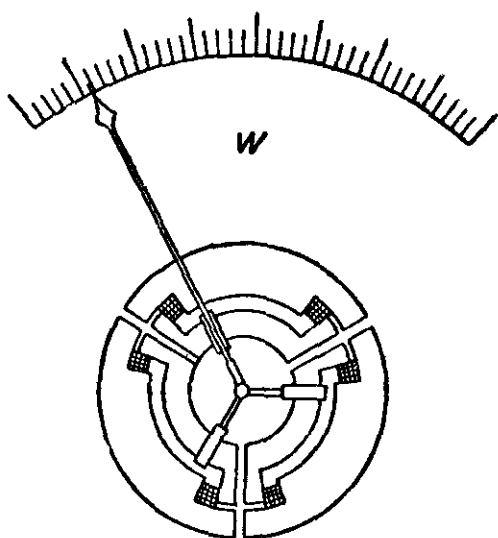


Рис 4-20 Схема устройства измерительного механизма ферродинамической системы с тремя элементами.

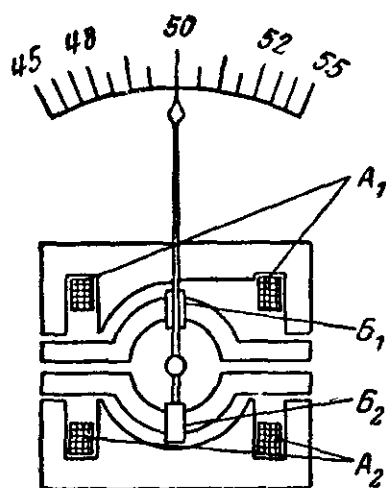


Рис. 4-21. Схема устройства измерительного механизма логометра ферродинамической системы.

займет положения, при котором моменты уравновесят друг друга.

Для этого положения подвижной части

$$M_1 = M_2$$

или

$$kI_1^2 f_1(\alpha) = kI_2^2 f_2(\alpha),$$

откуда

$$\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{f_2(\alpha)}{f_1(\alpha)} = f_3(\alpha)$$

или

$$\alpha = F\left(\frac{I_1^2}{I_2^2}\right). \quad (4-17)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части рассмотренного логометра ферродинамической системы зависит от отношения квадратов токов.

Ферродинамические логометры используются в приборах для измерения частоты, емкости, сдвига фаз и др.

4-5. ИНДУКЦИОННАЯ СИСТЕМА

В индукционных измерительных механизмах перемещение подвижной части происходит вследствие взаимодействия переменных магнитных потоков с токами, наведенными в подвижной части механизма.

На рис. 4-22 дана принципиальная схема устройства двухпоточного индукционного механизма.

Алюминиевый диск, укрепленный на одной оси с указательной стрелкой, охватывается двумя электромагнитами А и Б.

По обмотке электромагнитов проходят синусоидальные токи I_1 и I_2 , сдвинутые по фазе на угол ψ (рис. 4-23). Токи в обмотках вызывают магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , которые при ненасыщенных сердечниках будут синусоидальными и совпадают по фазе с намагничивающими токами. Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 , пронизывая диск, индуцируют в нем э. д. с.

E_1 и E_2 , отстающие по фазе от потоков Φ_1 и Φ_2 на угол $\pi/2$. Под действием этих э. д. с. в диске возникают вихревые токи i_1' и i_2' (рис. 4-24), которые при относительно малом индуктивном сопротивлении диска совпадают по фазе с соответствующими э. д. с. E_1 и E_2 .

Выбрав положительные направления магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 в сердечниках, нанесем, пользуясь правилом буравчика, положительные направления вихревых токов i_1' и i_2' в диске (рис. 4-24).

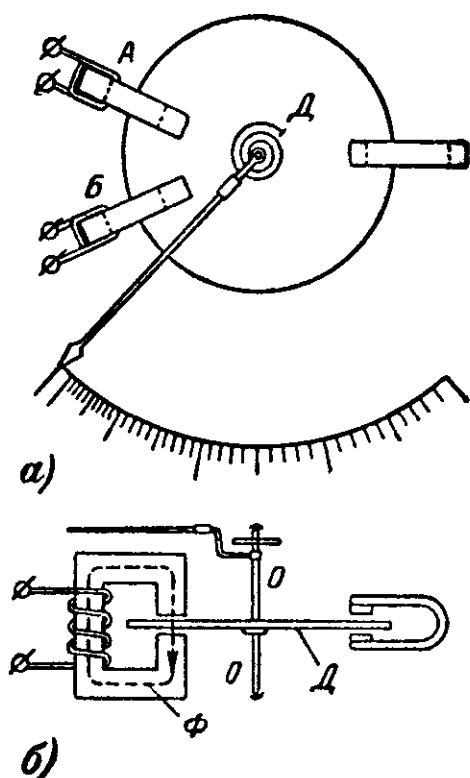


Рис. 4-22. Устройство индукционного двухпоточного измерительного механизма.

В результате взаимодействия вихревых токов, наведенных в диске, и магнитных потоков, пронизывающих диск, возникают два вращающих момента: M_1 и M_2 , вызванные взаимодействием потока Φ_2 с током i'_1 и потока Φ_1 с током i'_2 .

Положительные направления вращающих моментов, действующих на диск, на рис. 4-24 показаны стрелками.

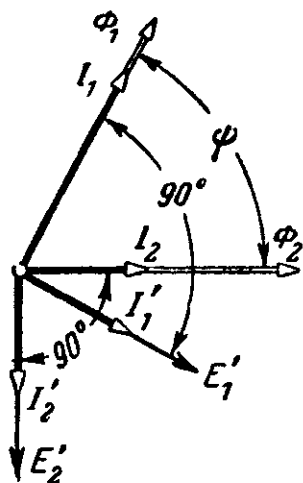


Рис. 4-23. Векторная диаграмма индукционного измерительного механизма.

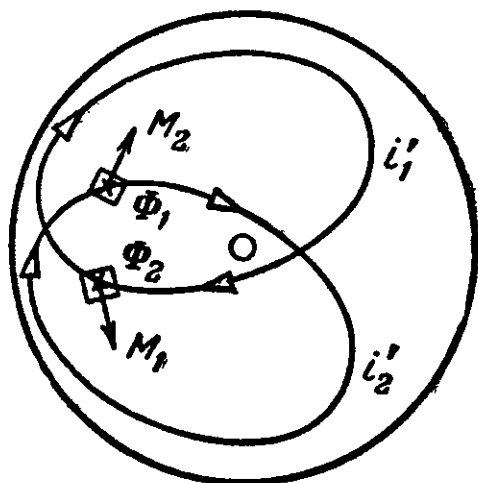


Рис. 4-24. Вихревые токи в диске индукционного измерительного механизма.

Среднее за период значение первого вращающего момента

$$M_1 = \frac{1}{T} \int_0^T k_1 \Phi_2 i'_1 dt.$$

Так как известно, что среднее за период значение произведения двух синусоидальных величин равно половине произведения их амплитудных значений и косинуса угла сдвига между ними, то

$$M_1 = \frac{k_1}{\sqrt{2}} \Phi_{m2} I'_1 \cos(\bar{\Phi}_{m2}, \bar{I}'_1).$$

Аналогично среднее за период значение второго вращающего момента

$$M_2 = \frac{k_2}{\sqrt{2}} \Phi_{m1} I'_2 \cos(\bar{\Phi}_{m1}, \bar{I}'_2).$$

Из векторной диаграммы (рис. 4-23) находим углы сдвига фаз:

$$\angle \bar{\Phi}_{m_2}, \bar{I}'_1 = 90^\circ - \psi$$

и

$$\angle \bar{\Phi}_{m_1}, \bar{I}'_2 = 90^\circ + \psi.$$

Приняв во внимание, что

$$\cos(90^\circ - \psi) = \sin \psi,$$

а

$$\cos(90^\circ + \psi) = -\sin \psi,$$

и обозначив $\frac{k_1}{\sqrt{2}}$ через k' , а $\frac{k_2}{\sqrt{2}}$ через k'' , получим:

$$M_1 = k' \Phi_{m_2} I'_1 \sin \psi$$

и

$$M_2 = -k'' \Phi_{m_1} I'_2 \sin \psi.$$

Пренебрегая индуктивностью диска, можно считать, что среднее значение вращающихся моментов от взаимодействия Φ_1 и i'_1 , а также Φ_2 и i'_2 равным нулю, так как Φ_1 и i'_1 сдвинуты по фазе на 90° ; поэтому

$$M'_1 = k'_1 \Phi_{m_1} I'_1 \cos(\bar{\Phi}_{m_1}, \bar{I}'_1) = 0$$

и аналогично

$$M'_2 = k'_2 \Phi_{m_2} I'_2 \cos(\bar{\Phi}_{m_2}, \bar{I}'_2) = 0.$$

Таким образом, результирующий момент, действующий на диск, будет:

$$M = M_1 - M_2 = k' \Phi_{m_2} I'_1 \sin \psi + k'' \Phi_{m_1} I'_2 \sin \psi.$$

Токи в диске зависят от э. д. с., наведенных в диске, и от его сопротивления, так как

$$I'_1 = \frac{E_1}{r_{д1}} \quad \text{и} \quad I'_2 = \frac{E_2}{r_{д2}}.$$

Так как э. д. с.

$$E_1 = c_1 f \Phi_{m_1} \quad \text{и} \quad E_2 = c_2 f \Phi_{m_2},$$

то

$$I'_1 = \frac{c_1}{r_{д1}} f \Phi_{m_1} \quad \text{и} \quad I'_2 = \frac{c_2}{r_{д2}} f \Phi_{m_2}.$$

Подставляя выражения токов в формулу результирующего вращающего момента, получаем:

$$M = \frac{k'c_1}{r_{д1}} f \Phi_{m1} \Phi_{m2} \sin \psi + \frac{k''c_2}{r_{д2}} f \Phi_{m1} \Phi_{m2} \sin \psi = k_3 f \Phi_{m1} \Phi_{m2} \sin \psi. \quad (4-18)$$

Последнее выражение показывает, что вращающий момент индукционного измерительного механизма зависит от частоты переменного тока, магнитных потоков, пронизывающих диск, от синуса угла сдвига фаз между ними и от сопротивления диска.

Из формулы следует, что при совпадающих по фазе магнитных потоках ($\psi=0$ и $\sin \psi=0$) вращающий момент будет равен нулю.

Для получения максимального вращающего момента необходимо, чтобы сдвиг фаз магнитных потоков был равен $1/4$ периода ($\psi=90^\circ$, $\sin \psi=1$).

При ненасыщенных сердечниках

$$\Phi_{m1} \equiv I_1 \text{ и } \Phi_{m2} \equiv I_2,$$

следовательно,

$$M = k_3 f \Phi_{m1} \Phi_{m2} \sin \psi = k_4 f I_1 I_2 \sin \psi. \quad (4-19)$$

При использовании механизма, например, в качестве ваттметра противодействующий момент создается спиральной пружиной. При равенстве вращающего и противодействующего моментов имеем:

$$k_4 f I_1 I_2 \sin \psi = D\alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_4 f}{D} I_1 I_2 \sin \psi = k_5 f I_1 I_2 \sin \psi. \quad (4-20)$$

Таким образом, как вращающий момент, так и угол поворота подвижной части механизма индукционной системы пропорциональны произведению частоты переменного тока, магнитных потоков, пронизывающих диск, и синуса угла сдвига между ними или произведению частоты, действующих значений токов, возбуждающих эти потоки и синуса угла сдвига между ними.

Благодаря незначительному сопротивлению магнитной цепи индукционные измерительные механизмы обладают сильным магнитным полем, а следовательно, боль-

шим вращающим моментом и малой чувствительностью к внешним магнитным полям.

Большой вращающий момент дает возможность иметь прочную подвижную часть, что обеспечивает стойкость механизма к перегрузкам.

Изменение температуры влияет на величину сопротивления диска и активные сопротивления обмоток и, следовательно, на показания механизмов.

В настоящее время индукционные измерительные механизмы используются главным образом в счетчиках электроэнергии.

На рис. 4-22, помимо двух электромагнитов, показан постоянный магнит, который в ваттметрах выполняет роль успокоителя, а в счетчиках электроэнергии служит для создания тормозного момента.

4-6. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

В электростатических измерительных механизмах для перемещения подвижной части используется взаимодействие между двумя или несколькими электрически заряженными проводниками.

На рис. 4-25 дана схема устройства одного из измерительных механизмов этой системы. Он состоит из двух неподвижных параллельно расположенных металлических пластин AA и одной подвижной секторообразной алюминиевой пластины B , укрепленной на одной оси с указательной стрелкой.

При наличии постоянного напряжения на зажимах неподвижные пластины будут заряжены электричеством одного знака, а подвижная — электричеством другого знака. Между пластинками возникает электрическое поле. Под действием сил электрического поля подвижная пластина бу-

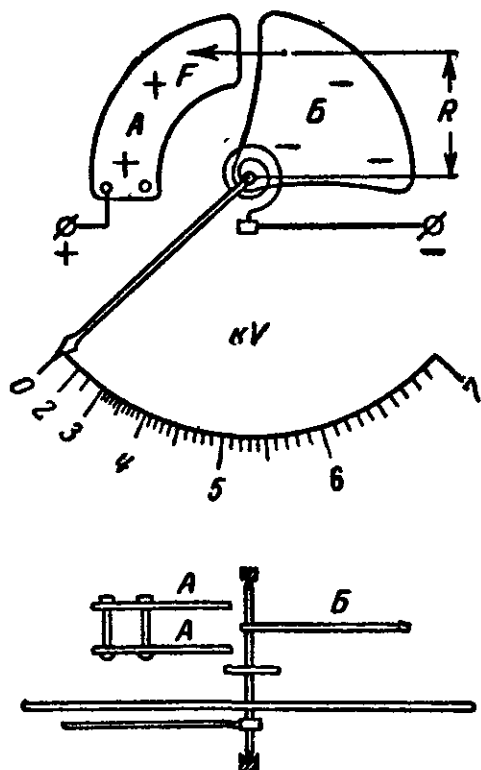


Рис. 4-25. Устройство электростатического измерительного механизма.

дет втягиваться в пространство между неподвижными пластинами, стремясь занять положение, при котором запасенная в электрическом поле энергия $\frac{cU^2}{2}$ будет иметь наибольшее значение.

Вращающий момент, действующий на подвижную часть [см. формулу (4-7)].

$$M = \frac{dW_0}{d\alpha} = \frac{d\left(\frac{cU^2}{2}\right)}{d\alpha} = \frac{U^2}{2} \frac{dC}{d\alpha}.$$

Величина $\frac{dC}{d\alpha}$ выражает скорость изменения емкости при повороте подвижной части механизма.

Приняв в первом приближении постоянным отношение $\frac{dC}{d\alpha} = k_1$, найдем, что

$$M = \frac{1}{2} k_1 U^2. \quad (4-21)$$

Установившееся положение подвижной части определяется равенством моментов

$$M = M_{\text{пр}} \text{ или } \frac{1}{2} k_1 U^2 = D\alpha,$$

откуда угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{k_1}{2D} U^2 = k_2 U^2. \quad (4-22)$$

При переменном напряжении мгновенный вращающий момент

$$M = k_1 u^2,$$

а средний момент

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = k_1 \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt = k_1 U^2.$$

Для положения равновесия подвижной части

$$M_{\text{ср}} = M_{\text{пр}} = D\alpha,$$

оттуда угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{k_1}{D} U^2 = k_2 U^2. \quad (4-23)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части прибора пропорционален квадрату измеряемого напряжения в цепи постоянного тока и квадрату действующего значения напряжения в цепи переменного тока. Характер шкалы квадратичный.

Множитель $dC/d\alpha = k_1$ за счет изменения формы и взаимного расположения подвижной и неподвижной пластин позволяет получить шкалу прибора достаточно равномерной в ее рабочей части.

На рис. 4-26 изображена другая конструкция электростатического механизма, состоящего из двух неподвижных пластин и одной подвижной (средней), подвешен-

Рис. 4-26. Другая конструкция электростатического измерительного механизма.

ной на тонких бронзовых ленточках. Если соединить левую и среднюю пластины и подключить их к одному проводу сети, а правую пластину — к другому проводу, то пластины, заряженные одноименно, будут отталкиваться, а заряженные разноименно — притягиваться, вследствие чего подвижная пластина будет перемещаться по направлению к пластине, заряженной электричеством противоположного знака (вправо). Это движение передается указательной стрелке. Шкала механизма, как и в предыдущем случае, неравномерна.

Рассмотренные измерительные механизмы изготовляются на номинальные напряжения 1—15 кВ.

В электростатических вольтметрах типов С-90 и С-50

с пределами измерения от 30 до 600 в и 1,5 кв для увеличения чувствительности увеличивают число подвижных (Б) и неподвижных (А) пластин (рис. 4-25). Таким образом, возрастает общая емкость всей системы. Кроме того, подвижная часть таких приборов выполняется на растяжках (см. § 3-3), а шкала — с внутренним световым отсчетом (§ 3-7).

Показания электростатических измерительных механизмов не зависят от внешних магнитных полей, температуры, частоты и формы кривой, но зависят от внешних электрических полей, так как собственное электрическое поле невелико. Для уменьшения влияния внешних электрических полей применяют металлический экран, соединенный с одним из зажимов вольтметра. Успокоение — воздушное или магнитоиндукционное. Собственное потребление на постоянном токе практически равно нулю, на переменном токе определяется величиной емкости, которая невелика (у приборов С-50 с пределами измерения до 1,5 кв — от 4 до 10 пф).

4-7. ТЕПЛОВАЯ СИСТЕМА

В измерительных механизмах тепловой системы используется тепловое действие электрического тока, которое вызывает удлинение или изгиб проводника. На рис. 4-27 дана схема устройства одного из измерительных механизмов. Тонкая платино-иридиевая проволока укреплена между зажимами БГ. К ней прикреплена вторая — ВЖ, неподвижно закрепленная в точке Ж. К середине второй проволоки прикрепляется шелковая нить, переброшенная через блок З и укрепленная на конце пружины Е. На одной оси с блоком укреплены указательная стрелка и алюминиевый сектор магнитоиндукционного успокоителя.

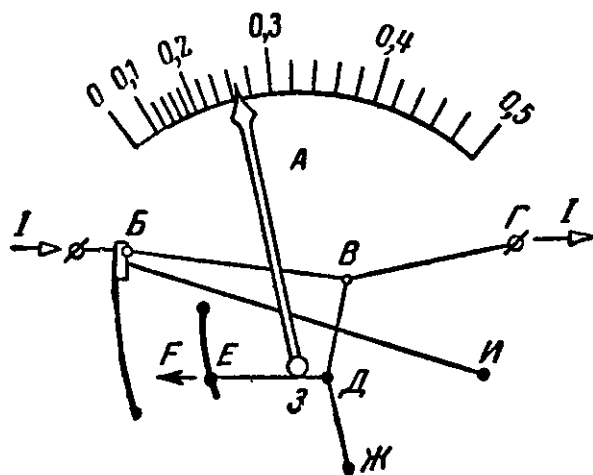


Рис 4-27. Схема устройства теплового измерительного механизма.

При прохождении тока по проволоке *БВГ* она нагревается и удлиняется, точка *В* опускается и пружина *Е* получает возможность переместить шелковую нить *ДЗЕ* влево. Это перемещение влечет за собой поворот подвижной части механизма.

Удлинение проволоки *БВГ* пропорционально количеству выделенного током тепла в единицу времени, а следовательно, пропорционально квадрату тока:

$$\Delta l = k_1 I^2,$$

где Δl — удлинение проволоки;

k_1 — коэффициент пропорциональности.

Так как угол поворота подвижной части зависит от удлинения проволоки, то он будет зависеть и от тока, т. е.

$$\alpha = f(I). \quad (4-24)'$$

Для уменьшения влияния температуры окружающей среды на натяжение проволоки, а следовательно, и на показания прибора зажим *Б* укрепляется на конце пружины. Положение этого зажима определяется длиной компенсационной проволоки *БИ*, имеющей примерно такой же температурный коэффициент удлинения, как и проволока *БВГ*. При изменении температуры изменяется длина компенсационной проволоки, и зажим *Б* перемещается так, что натяжение проволоки *БВГ* остается независимым от температуры.

Успокоение магнитоиндукционное осуществляется с помощью постоянного магнита и алюминиевого сектора, укрепленного на одной оси со стрелкой. Показания прибора одинаковы на постоянном и переменном токе и почти не зависят от внешних магнитных и электрических полей. Проволока, нагреваемая током, практически безреактивна, и поэтому такие приборы используются при измерениях на высоких частотах. В настоящее время вместо тепловых приборов изготавливаются термоэлектрические приборы (см. § 5-4).

Применяются также тепловые измерительные механизмы с использованием изгиба проводника (биметаллические механизмы), в которых измеряемый ток проходит по биметаллической рабочей спирали *1* (рис. 4-28). Спиральная пружина *2* служит для подвода тока к спирали *1*. Вторая биметаллическая пружина *3*, намо-

танная встречно относительно первой, служит для компенсации температурных влияний окружающей среды. Шайба 4 изолирует спираль 3 от тепла, выделяемого измеряемым током в рабочей спирали. Биметаллический измерительный механизм нечувствителен к кратковременным перегрузкам и не регистрирует кратковремен-

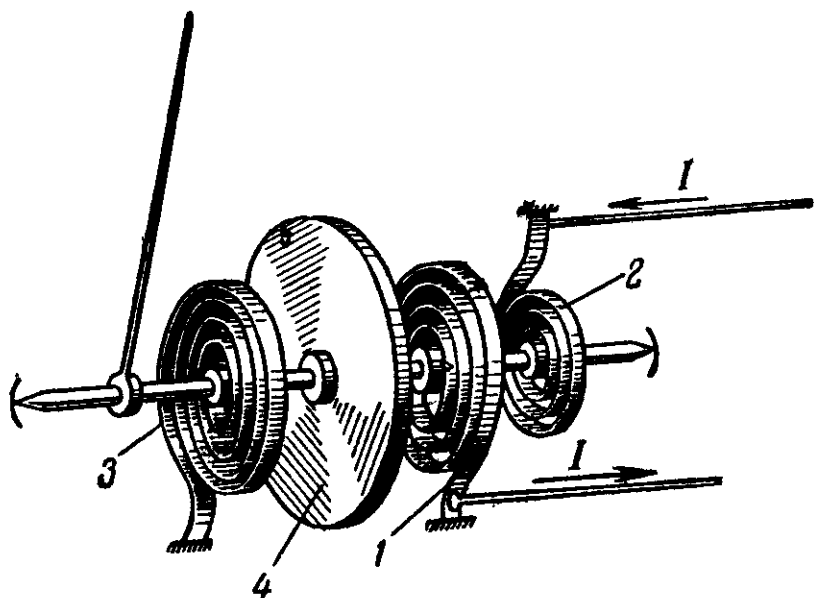


Рис. 4-28. Схема устройства биметаллического теплового механизма.

ных импульсов тока или напряжения. Применяются такие механизмы в самопишущих приборах или для указания длительных перегрузок.

Глава пятая

ПРИБОРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

5-1. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

а) Магнитоэлектрические амперметры. Шунты

В простейшем случае для измерения тока применима схема цепи измерительного прибора, в которой весь измеряемый ток проходит по обмотке подвижной катушки измерительного механизма (см. § 4-1). Такую схему имеют магнитоэлектрические микроамперметры и мил-

лиамперметры. Пределы измерения таких приборов обычно не превосходят 15—30 *ма*. При больших токах возможен нагрев спиральных пружин и изменение их упругих свойств.

В амперметрах и миллиамперметрах для расширения предела измерения применяется шунт. Он представляет

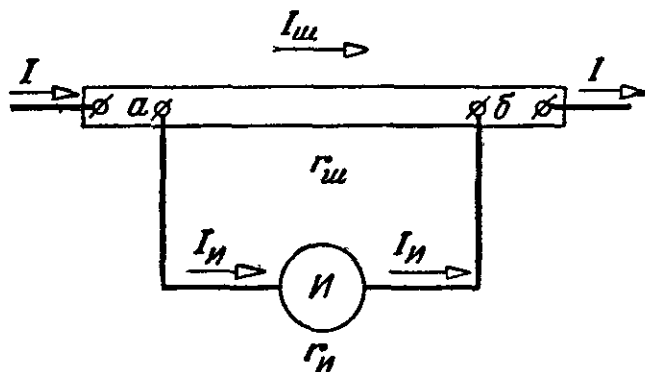


Рис. 5-1. Схема соединения измерительного механизма с шунтом.

собой сопротивление, включаемое в цепь измеряемого тока; параллельно шунту присоединяется измерительный механизм (рис. 5-1).

Обозначив I —измеряемый ток, $I_{ш}$ и $r_{ш}$ —ток и сопротивление шунта, $I_{и}$ и $r_{и}$ —ток и сопротивление измерительного механизма, можно написать:

$$U_{аб} = I_{и} r_{и} = I \frac{r_{ш} r_{и}}{r_{ш} + r_{и}},$$

откуда

$$I = I_{и} \frac{r_{ш} + r_{и}}{r_{и}} = I_{и} \left(\frac{r_{и}}{r_{ш}} + 1 \right) = I_{и} p = C_I \alpha p, \quad (5-1)$$

где C_I —постоянная измерительного механизма по току;

α —угол отклонения подвижной части;

$p = \frac{I}{I_{и}}$ —шунтирующий множитель, показывающий, во сколько раз измеряемый ток больше тока измерительного механизма или, что то же, во сколько раз расширяется предел измерения тока.

Шунтирующий множитель

$$p = \frac{r_{и}}{r_{ш}} + 1 \quad (5-2)$$

может быть определен, если известны сопротивления измерительного механизма и шунта.

Следует обратить внимание на то, что соотношение между измеряемым током и током измерительного механизма, определяемое шунтирующим множителем, остается неизменным только до тех пор, пока остаются неизменными сопротивления $r_{ш}$ и $r_{и}$.

Из уравнения (5-2) следует, что

$$r_{ш} = \frac{r_{и}}{p-1}. \quad (5-3)$$

Последнее уравнение показывает, что для расширения предела измерения тока в p раз необходим шунт с сопротивлением, в $(p-1)$ раз меньшим сопротивления измерительного механизма.

Кроме рассмотренных однопредельных шунтов, переносные приборы часто снабжаются многопредельными шунтами (рис. 5-2—5-4), дающими возможность иметь несколько пределов измерения тока. Многопредельный шунт состоит из нескольких сопротивлений, переключаемых в зависимости от предела измерения или штепселем, или рычажным переключателем,

или, наконец, простым переключением провода с одного зажима на другой. Для любого из трех положений штепселя или рычажного переключателя (рис. 5-2 и 5-3) можно написать:

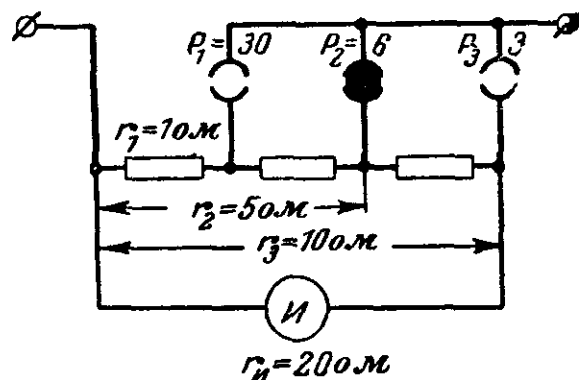


Рис 5-2. Схема многопредельного шунта с штепсельным переключателем.

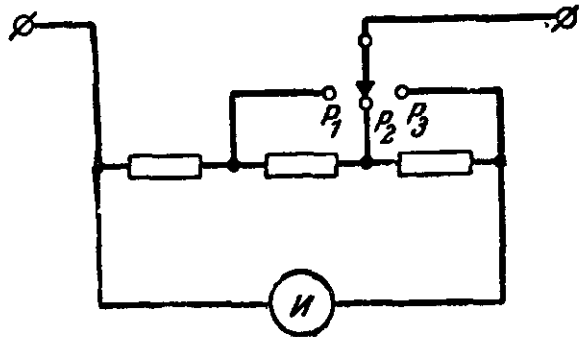


Рис. 5-3. Схема многопредельного шунта с рычажным переключателем.

$$U = I_{и} (r_{и} + r_{д}) = I \frac{(r_{и} + r_{д}) r_{ш}}{r_{и} + r_{д} + r_{ш}},$$

откуда

$$I = I_{\text{и}} \frac{r_{\text{и}} + r_{\text{д}} + r_{\text{ш}}}{r_{\text{ш}}} = I_{\text{и}} \frac{r}{r_{\text{ш}}} = I_{\text{и}} p, \quad (5-4)$$

где $r_{\text{д}}$ — та часть сопротивления многопредельного шунта, которая при данном положении штепселя или рычажного переключателя включена последовательно с измерительным механизмом;
 $r = r_{\text{и}} + r_{\text{д}} + r_{\text{ш}}$ — постоянное сопротивление контура.

Полученная формула показывает, что при постоянном сопротивлении контура (рис. 5-2) шунтирующий множитель зависит только от сопротивления шунта.

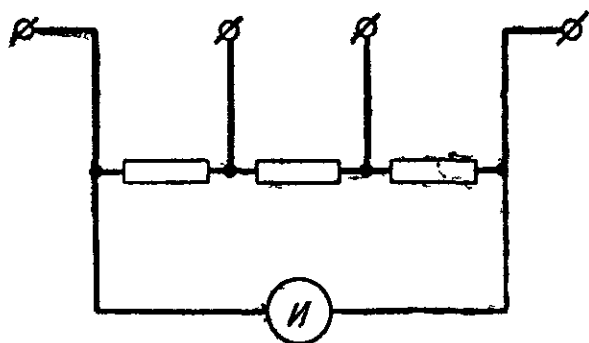


Рис. 5-4. Схема многопредельного шунта.

Шунты изготавливаются из манганиновой проволоки, ленты или стержней, укрепленных между наконечниками, на которых имеются две пары зажимов. Одна пара зажимов (токовые) служит для включения шунта

в цепь, другая пара зажимов (потенциальные) служит для приключения к шунту измерительного механизма.

Применение двух пар зажимов у шунтов позволяет устранить влияние переходных сопротивлений контактов на показание прибора.

Шунты должны иметь достаточное сечение, исключающее возможность нагревания их током выше допустимых значений, в противном случае неизбежны погрешности в измерении тока. Шунты делятся на внутренние и наружные; первые помещаются внутри кожуха прибора, вторые выполняются в виде отдельной от прибора детали. Наружные шунты соединяются с прибором при помощи специальных проводов и делятся на индивидуальные и калиброванные. Индивидуальный шунт можно применять только с тем прибором, который градуировался с данным шунтом.

Калиброванный шунт можно применять с любым прибором, предел измерения напряжения которого соответствует указанному на шунте падению напряжения.

По ГОСТ 1845-59 калиброванные шунты изготавливают на номинальные напряжения 45, 75, 100 и 150 мВ, а по точности делятся на шесть классов: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; и 1,0. Числовой знак класса точности обозначает величину допустимого отклонения сопротивления шунта в процентах от его номинального значения.

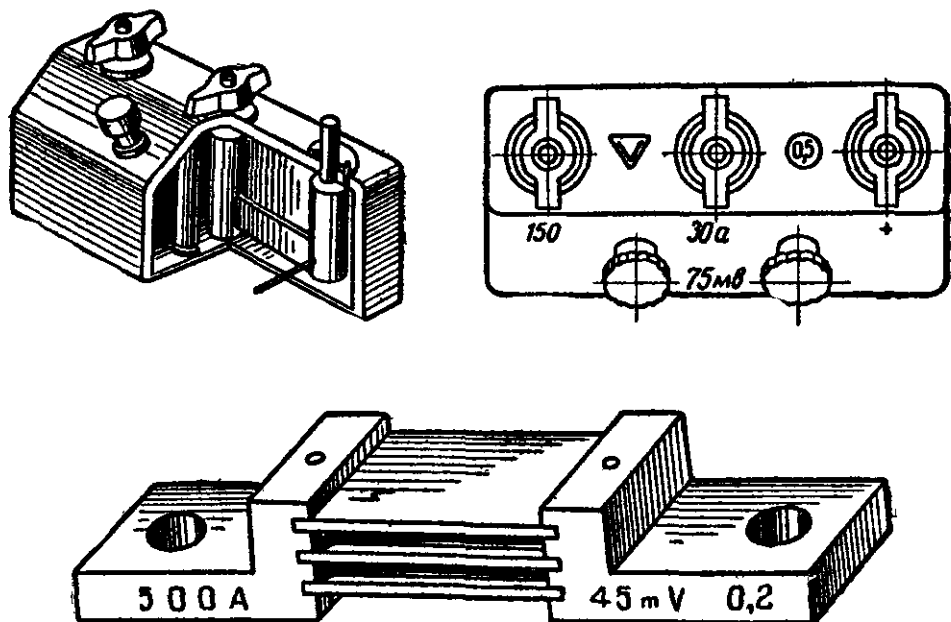


Рис. 5-5. Внешний вид шунтов.

На рис. 5-5 дан внешний вид шунтов. Шунты изготавливаются на токи до 6 000 а. Наружные шунты на ток от 75 а обычно имеют номинальное напряжение 45 или 75 мВ.

б) Магнитоэлектрические вольтметры. Добавочные сопротивления

В магнитоэлектрических вольтметрах применяется тот же измеритель, что и в амперметрах, но на меньший номинальный ток. Для измерения напряжения механизм применяется в сочетании с добавочным сопротивлением. Ток полного отклонения в магнитоэлектрических вольтметрах составляет 1—7,5 ма. Добавочное сопротивление из манганина включается последовательно с измерительным механизмом (рис. 5-6). Оно необходимо, чтобы сопротивление вольтметра r_v при изменениях температуры оставалось неизменным.

Ток в цепи прибора

$$I_{\text{и}} = \frac{U}{r_{\text{и}} + r_{\text{д}}} = \frac{U_{\text{и}}}{r_{\text{и}}}.$$

Если напряжение $U = pU_{\text{и}}$, то добавочное сопротивление $r_{\text{д}}$ можно определить из условия

$$I_{\text{и}} = \frac{U_{\text{и}}}{r_{\text{и}}} = \frac{pU_{\text{и}}}{r_{\text{и}} + r_{\text{д}}},$$

откуда

$$r_{\text{д}} = r_{\text{и}}(p - 1); \quad (5-5)$$

$$U = C_U \alpha p. \quad (5-6)$$

Множитель p показывает, во сколько раз измеряемое напряжение больше напряжения на измерительном ме-

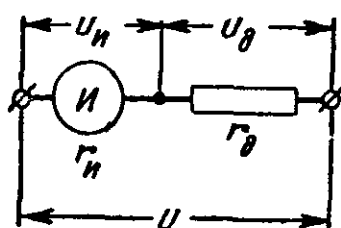


Рис 5-6. Схема соединения измерительного механизма с добавочным сопротивлением.

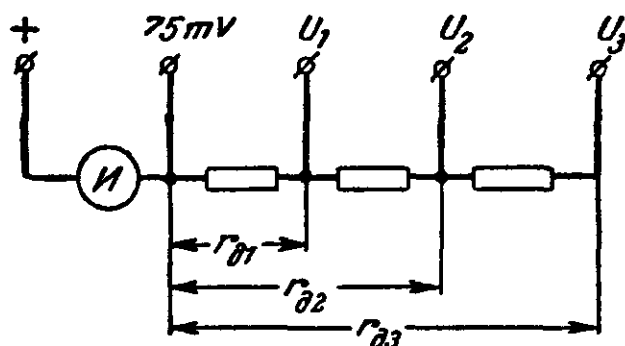


Рис. 5-7. Схема соединения измерительного механизма с многопредельным добавочным сопротивлением (вольтметр).

ханизме или, иначе, во сколько раз увеличивается предел измерения напряжения прибора при применении добавочного сопротивления.

Следует обратить внимание на то, что соотношение между измеряемым напряжением и напряжением на измерительном механизме, определяемое множителем p , остается неизменным только до тех пор, пока остаются неизменными сопротивления $r_{\text{и}}$ и $r_{\text{д}}$.

Из выражения (5-5) следует, что в общем случае добавочное сопротивление к вольтметру

$$r_{\text{д}} = r_{\text{и}}(p - 1). \quad (5-7)$$

Последняя формула показывает, что для расширения предела измерения напряжения в p раз добавочное сопротивление должно быть в $(p-1)$ раз больше сопротивления измерительного механизма.

Часто применяют добавочные сопротивления, подразделенные на несколько частей (рис. 5-7), что дает возможность иметь прибор на несколько пределов измерения напряжения.

Добавочные сопротивления обычно изготавливаются из манганина.

Изолированная манганиновая проволока наматывается на каркасы или пластины, изготовленные из изолирующих материалов (дерево, пластмасса, фарфор, гетинакс). Добавочные сопротивления для постоянного тока наматываются унифицированно, а для переменного тока — бифилиарно, с тем, чтобы получить безреактивное сопротивление.

Добавочные сопротивления делятся на наружные и внутренние. Наружные добавочные сопротивления выполняются в виде отдельной детали в особом корпусе и бывают индивидуальными и калиброванными. Индивидуальное сопротивление может применяться только с тем прибором, который градуировался совместно с данным добавочным сопротивлением.

Калиброванное добавочное сопротивление может применяться с любым прибором, номинальный ток которого не превышает номинального тока добавочного сопротивления.

Согласно ГОСТ 1845-59 калиброванные добавочные сопротивления делятся, как и шунты, на шесть классов точности и изготавливаются на номинальные токи 0,5; 1,0; 3,0; 5,0; 7,5; 15 и 30 *ма*.

в) Свойства амперметров и вольтметров магнитоэлектрической системы

При включении магнитоэлектрического миллиамперметра или микроамперметра в электрическую цепь измеряемый ток идет по его обмотке.

При этом изменение температуры окружающего воздуха не вызывает дополнительных погрешностей, так как изменение сопротивления медной обмотки прибора

практически не влияет на величину тока, который в этом случае зависит от параметров всей цепи.

В случае применения шунта (рис. 5-1) изменение температуры вызывает изменение сопротивления обмотки измерительного механизма (медь с температурным коэффициентом $\beta_m = 0,4\%$) и не вызывает изменения сопротивления шунта (манганин с температурным коэффициентом $\beta_{mn} \approx 0$).

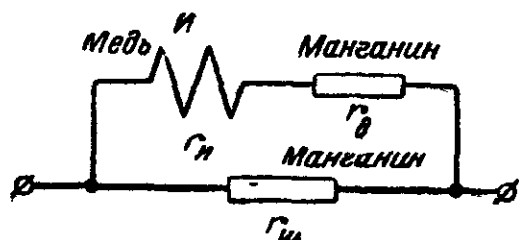


Рис 5-8 Схема температурной компенсации технических амперметров.

Это приводит к изменению распределения токов в параллельных ветвях, к изменению шунтирующего множителя и, следовательно, к дополнительной погрешности от температуры. В этом случае эта погреш-

ность составляет $0,4\%$ на каждый градус измерения температуры, что недопустимо.

Для уменьшения этой погрешности необходимо уменьшить температурный коэффициент ветви измерительного механизма, что достигается включением добавочного сопротивления из манганина последовательно с обмоткой рамки (рис. 5-8).

В этом случае температурный коэффициент ветви измерительного механизма

$$\beta = \frac{\beta_m r_{\text{и}} + \beta_{\text{мн}} r_{\text{д}}}{r_{\text{и}} + r_{\text{д}}} = \frac{\beta_m r_{\text{и}} + 0 r_{\text{д}}}{r_{\text{и}} + r_{\text{д}}} = \beta_m \frac{r_{\text{и}}}{r_{\text{и}} + r_{\text{д}}}. \quad (5-8)$$

Взяв, например, добавочное сопротивление, в 9 раз большее сопротивлений обмотки рамки, получим для ее ветви как температурный коэффициент, так и погрешность, в 10 раз меньшие.

Таким путем уменьшаются дополнительные погрешности у амперметров классов точности 1; 1,5 и 2,5.

Температурная компенсация у амперметров более высоких классов точности достигается применением более сложных схем.

В вольтметрах для расширения предела измерения напряжения последовательно с ним включается добавочное сопротивление из манганина (рис. 5-9). Это сопротивление одновременно обеспечивает достаточную

температурную компенсацию, снижая температурный коэффициент вольтметра до необходимого значения.

В милливольтметрах, у которых добавочное сопротивление относительно невелико и не может обеспечить достаточной температурной компенсации применительно к классам точности 0,2 и 0,5, применяется последовательно-параллельная схема температурной компенсации, представленная на рис. 5-10

В этой схеме при повышении температуры увеличивается эквивалентное сопротивление разветвленной части цепи главным образом за счет увеличения сопротивления меди шунта. Это увеличение сопротивления при неизменном напряжении на зажимах цепи милливольтметра приведет к уменьшению тока в цепи, уменьшению напряжения на сопротивлении $r_{д2}$, и следовательно, к увеличению напряжения на разветвлении.

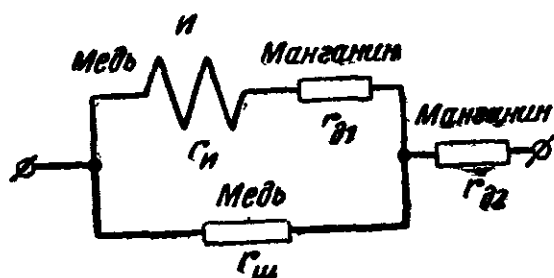


Рис 5-10 Схема температурной компенсации лабораторных приборов.

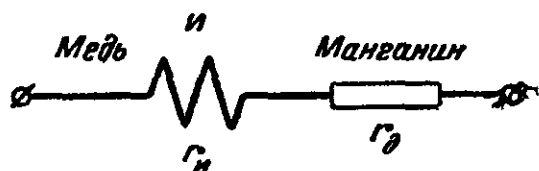


Рис. 5-9 Схема температурной компенсации технических вольтметров

Если относительное увеличение напряжения на разветвлении будет сопровождаться таким же относительным увеличением сопротивления ветви измерителя (медь—манганин), то ток в цепи измерителя не будет изменяться от температуры и, следовательно, будет достигнута полная температурная компенсация.

Милливольтметр с такой схемой может быть использован и в качестве амперметра путем дополнения схемы шунтом. Такая схема применяется в большом числе приборов, изготавливаемых отечественной промышленностью.

Кроме рассмотренных применяется также простая схема температурной компенсации, в которой используется термокомпенсатор r_k (рис. 5-11), представляющий сочетание нелинейного термосопротивления $ТС$ и сопротивления из манганина r . Такие термокомпенсато-

ры имеют практически линейную зависимость от температуры в диапазоне $20 \pm 10^\circ \text{C}$ и обеспечивают надежную температурную компенсацию магнитоэлектрических милливольтметров невысоких классов точности.

Магнитоэлектрические приборы принадлежат к наиболее точным и чувствительным электроизмерительным приборам. Отечественная промышленность выпускает переносные многопредельные амперметры и вольтметры высших классов точности и щитовые приборы классов 1,0; 1,5; 2,5;

Влияние внешнего магнитного поля на магнитоэлектрические приборы невелико. Все же для устранения,

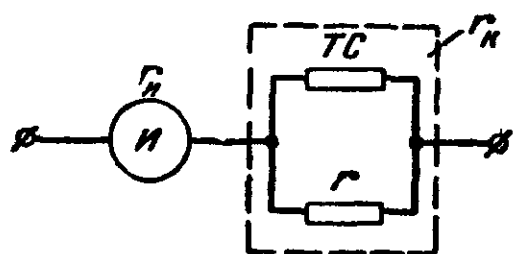


Рис. 5-11. Схема температурной компенсации с применением термокомпенсатора.

хотя и незначительной, погрешности от влияния земного магнитного поля приборы высокой точности необходимо располагать так, чтобы направление стрелки с буквами *N* и *S*, нанесенной на корпус прибора, совпало с меридианом в данном месте.

Сильное собственное магнитное поле прибора может вызвать в отдельных случаях изменение показания других рядом расположенных приборов.

Положительные свойства магнитоэлектрических приборов:

- 1) большая точность;
- 2) высокая чувствительность;
- 3) малое влияние внешних магнитных полей;
- 4) незначительное влияние температуры;
- 5) малая мощность потерь;
- 6) равномерная шкала;
- 7) хорошее успокоение.

Отрицательные свойства магнитоэлектрических приборов:

- 1) пригодность только для постоянного тока;
- 2) чувствительность к перегрузкам, обусловленная тем, что при перегрузках пружины легко перегреваются и меняют свои упругие свойства или совсем перегорают;
- 3) сравнительно высокая стоимость.

Магнитоэлектрические приборы благодаря своим достоинствам получили весьма широкое распространение: во-первых, они применяются как образцовые и лабораторные приборы в цепях постоянного тока, во-вторых, они применяются во всех случаях, где требуется отно-

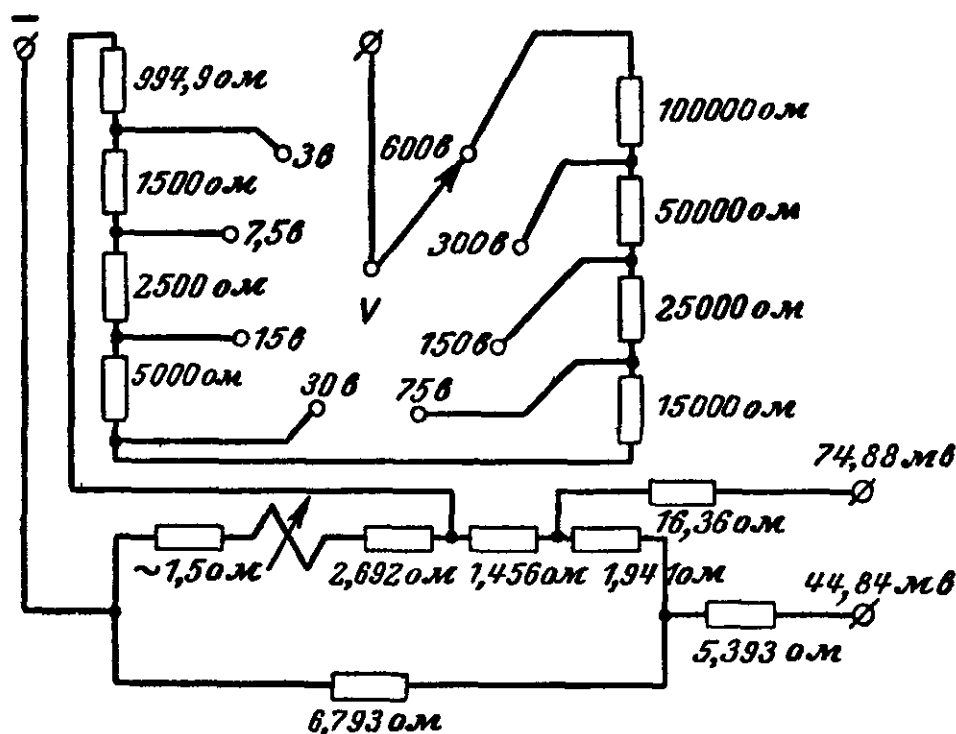


Рис. 5-12. Принципиальная схема вольтметра типа М106.

сительно высокая чувствительность, и, наконец, как технические приборы с повышенной точностью.

На рис. 5-12 дана принципиальная схема переносного многопредельного магнитоэлектрического вольтметра типа М106 класса 0,2 со стрелочным отсчетом. Для пределов измерений 45 и 75 мВ предусмотрены отдельные зажимы, к которым прибор должен подключаться с помощью специальных калиброванных проводов. Переключение других пределов измерения производится при помощи рычажного переключателя. Путем присоединения стандартных шунтов на 45 и 75 мВ при помощи калиброванных проводов, имеющих строго определенное сопротивление, можно расширить предел измерения по току.

На рис. 5-13 дана принципиальная схема переносного многопредельного микроамперметра типа М95 с наружным шунтом типа Р-4. Для увеличения чувствительности прибора подвижная часть укреплена на растяж-

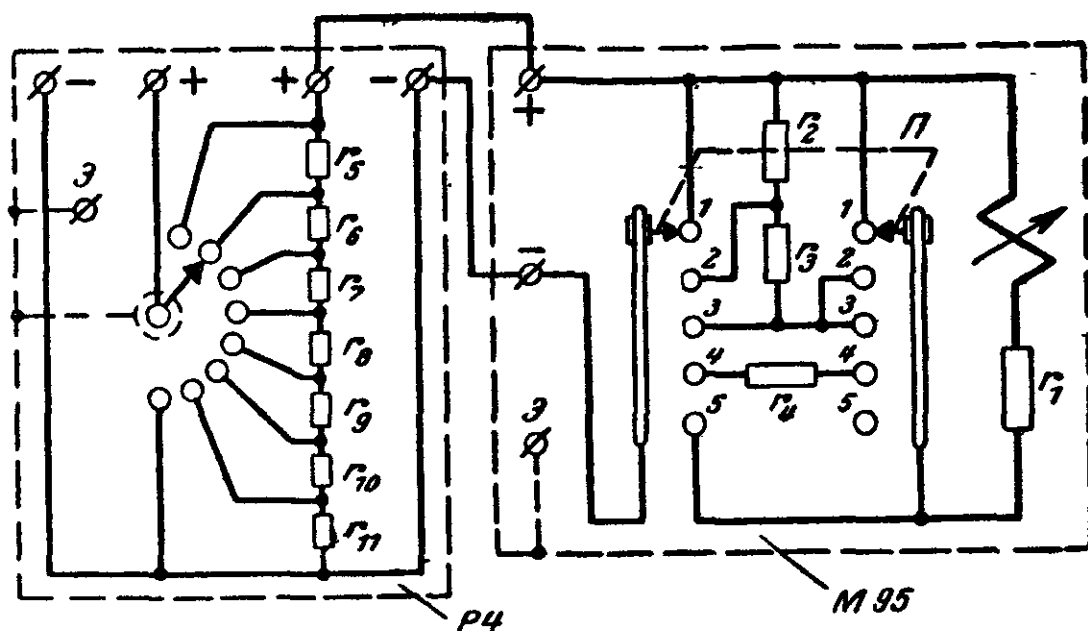


Рис. 5-13. Принципиальная схема микроамперметра типа М-95 с многопредельным шунтом типа Р-4.

Положение переключателя П: 1 — арретир; 2 и 3 — микроамперметр; 4 — милливольтметр; 5 — прибор с наружным шунтом Р-4.

ках, а стрелка заменена световым указателем. Для исключения влияния токов утечки, могущих изменить результаты измерения, прибор и шунт снабжены спе-

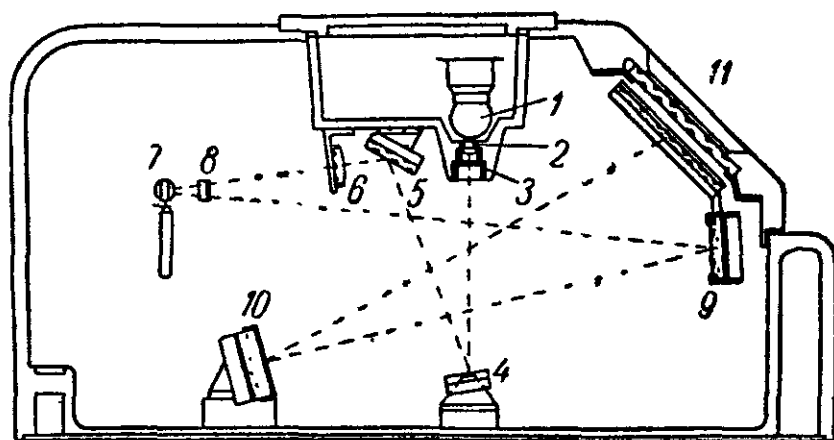


Рис. 5-14. Схема оптического устройства микроамперметра типа М95.

циальными экранами. Зажимы экрана должны подключаться к одному из зажимов прибора, к которому подключена измеряемая цепь.

Оптическая схема прибора (рис. 5-14) состоит из лампы-осветителя 1, конденсатора 2, диафрагмы 3, зеркал 4, 5, 8, 9, 10, объектива 6, зеркала подвижной части 7 и шкалы 11. Длина луча 400 мм, но благодаря

двукратному отражению луча от зеркала подвижной части достигается увеличение чувствительности вдвое.

Приборостроительные заводы СССР выпускают серию многопредельных приборов постоянного тока класса 0,1 со световым указателем и двухрядной шкалой.

5-2. ГАЛЬВАНОМЕТРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Гальванометрами называются приборы с непосредственным отсчетом для измерения тока, напряжения и количества электричества, имеющие большую чувствительность, шкала которых градуируется наблюдателем.

Гальванометры по принципу действия делятся на следующие системы: магнитоэлектрические, термоэлектрические, электронноламповые, электромагнитные, электродинамические, электростатические и др. Однако наибольшее распространение получили магнитоэлектрические гальванометры с неподвижным магнитом для постоянного тока и магнитоэлектрические вибрационные (резонансные) гальванометры для переменного тока. В цепях постоянного тока гальванометры применяются:

1) для измерения малых токов, например при измерении больших сопротивлений;

2) для измерения малых напряжений и э. д. с., например термо-э. д. с.;

3) для определения равенства потенциалов между какими-либо точками электрической цепи или для определения отсутствия тока в каком-либо участке электрической цепи, например нулевые гальванометры в мостовых и компенсационных схемах;

4) для определения равенства двух токов, например дифференциальные гальванометры для измерения сопротивлений.

Гальванометры, предназначенные для измерения импульсов тока или, что то же, для измерения количества электричества, протекающего по цепи в течение коротких промежутков времени (долей секунды), называются баллистическими гальванометрами. Они применяются при измерении емкости, индуктивности, взаимной индуктивности и магнитных потоков.

Гальванометры переменного тока применяются или для измерения малых действующих значений тока, на-

пример термогальванометры, или в большинстве случаев как нулевые гальванометры в мостовых и компенсационных схемах, например вибрационные гальванометры.

По способу отсчета гальванометры делятся на гальванометры с зеркальным отсчетом высшей чувствительности (для постоянного тока чувствительность таких гальванометров составляет величину $1 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{10}$ мм/а) и гальванометры со стрелочным и световым отсчетом меньшей чувствительности по сравнению с зеркальными (чувствительностью порядка $1 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^7$ мм/а).

а) Магнитоэлектрические гальванометры с неподвижным магнитом для постоянного тока

Измерительные механизмы стрелочных магнитоэлектрических гальванометров в основном имеют такое же устройство, как и измерительные механизмы той же системы, применяемые в приборах низкой чувствительности — миллиамперметрах и амперметрах, рассмотренных выше.

Повышение чувствительности в гальванометрах, как следует из выражения (4-2),

$$S_I = \frac{BS\omega}{D} \quad (5-9)$$

достигается увеличением магнитной индукции B , увеличением числа витков рамки ω и применением пружин с меньшим удельным противодействующим моментом.

В приборах высокой чувствительности, имеющих малый вращающий момент, получение малого противодействующего момента и устранение трения достигаются креплением подвижной части на растяжках (рис. 3-6,а) или подвешиванием подвижной части на упругой ленточке-подвесе (рис. 3-6,б).

Следующим средством повышения чувствительности является зеркальный (световой) отсчет, применяемый в гальванометрах с подвесной рамкой.

В этом случае шкала A с осветителем B (рис. 5-15,а) устанавливается на расстоянии 100—150 см от гальванометра. Луч света F' от лампы осветителя падает на зеркальце $З$, укрепленное на подвижной части гальванометра, а отраженный от зеркальца луч F'' падает на

шкалу A , давая на ней изображение нити лампы или щели, расположенной перед лампой (световой зайчик).

Если подвижная часть гальванометра находится в нулевом положении (рис. 5-15,б), то отраженный от зеркальца луч падает на нулевое деление шкалы. При повороте подвижной части на угол α (рис. 5-15,в) отра-

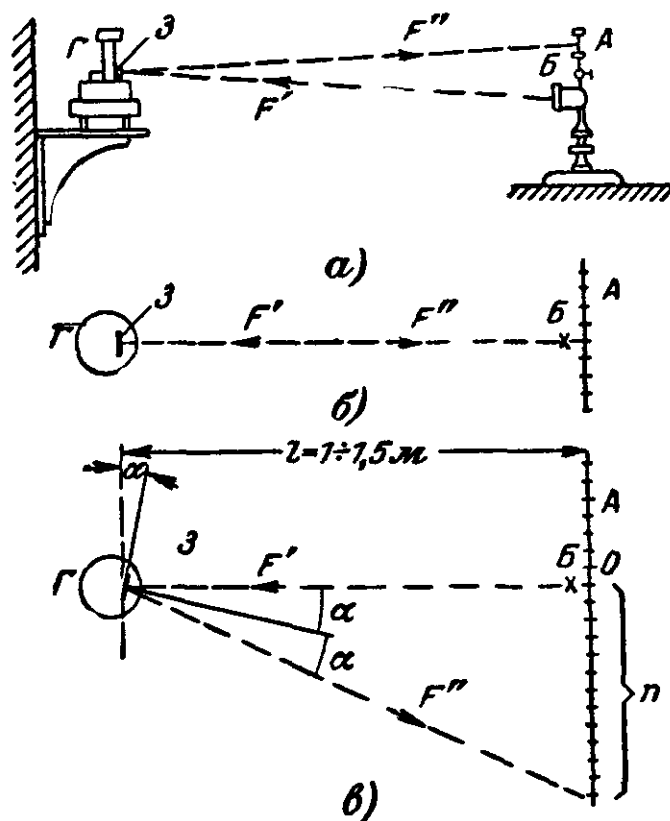


Рис. 5-15. Зеркальный отсчет (горизонтальный).

женный луч F'' отклоняется на угол 2α и падает на какое-то деление шкалы n . Если деление шкалы равно 1 мм и расстояние l от зеркала до шкалы выражено в миллиметрах, то

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{n}{l}. \quad (5-10)$$

При малых углах (до 3°) $\operatorname{tg} 2\alpha$ можно заменить углом 2α и, следовательно,

$$\alpha = \frac{n}{2l} \quad (5-11)$$

или

$$n = 2l\alpha. \quad (5-12)$$

Из написанного следует, что при постоянном l число делений шкалы, на которое перемещается световой зайчик, пропорционально углу поворота подвижной части гальванометра.

При зеркальном отсчете угол поворота определяется числом миллиметров линейного перемещения светового зайчика по шкале; поэтому чувствительность гальванометра к току определяется отношением линейного перемещения светового зайчика к току, т. е.

$$S_I = \frac{n}{I} = \frac{2l\alpha}{I}.$$

Если бы тот же гальванометр имел стрелку длиной l_c и шкалу с делениями в миллиметрах, то линейное перемещение конца стрелки, выраженное в миллиметрах, выражалось бы так:

$$n_c = l_c \alpha.$$

Определяя в этом случае его чувствительность отношением перемещения конца стрелки к току, получаем:

откуда

$$S_{Ic} = \frac{n_c}{I} = \frac{l_c \alpha}{I},$$

$$\frac{S_I}{S_{Ic}} = \frac{2l\alpha I}{I l_c \alpha} = 2 \frac{l}{l_c},$$

т. е. чувствительность при зеркальном отсчете увеличивается в $2 \frac{l}{l_c}$ раз. Например, при расстоянии от зеркала до шкалы $l = 1000 \text{ мм}$ и длине стрелки $l_c = 100 \text{ мм}$ получаем:

$$\frac{S_I}{S_{Ic}} = 2 \frac{1000 \text{ мм}}{100 \text{ мм}} = 20,$$

т. е. зеркальный отсчет дает увеличение чувствительности в 20 раз.

Наряду с рассмотренным однократным отражением луча применяется многократное отражение для получения высокой чувствительности в гальванометрах с подвижной частью на растяжках.

Кроме горизонтальной установки гальванометра и отсчетного устройства чаще применяется вертикальная установка (рис. 5-16).

В отличие от рассмотренного объективного метода отсчета применяется еще субъективный метод, при котором отсчетное устройство состоит из шкалы и зрительной трубы, на объективе которой наносится вертикальная черта. При этом способе отсчета отклонение

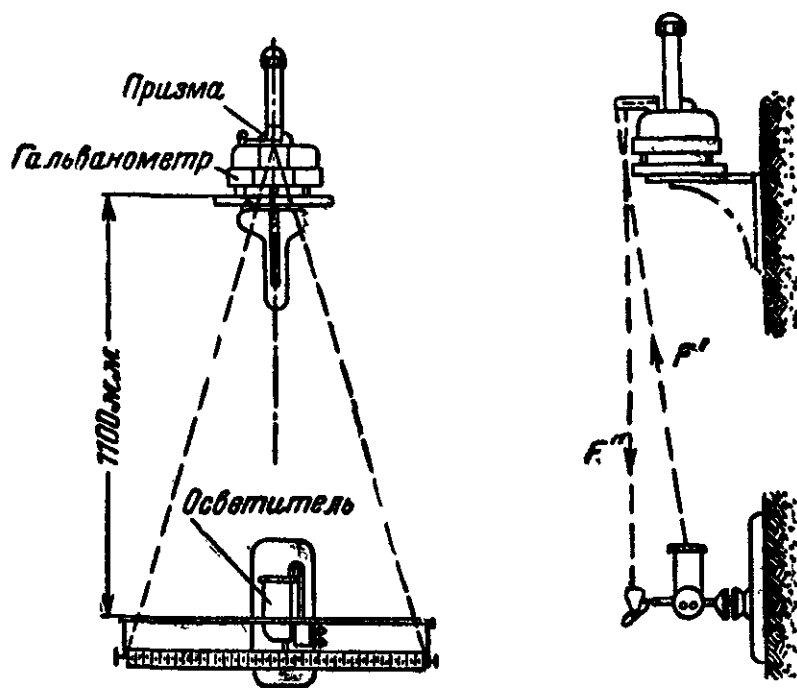


Рис. 5-16. Зеркальный отсчет (вертикальный).

подвижной части наблюдается через зрительную трубу и отсчет производится по делению шкалы, совпадающему с вертикальной чертой (рис. 5-17,б).

При работе с гальванометром важным является не только его чувствительность или постоянная, но и время успокоения его подвижной части.

В большинстве стрелочных гальванометров, так же как в магнитоэлектрических приборах низкой чувствительности, алюминиевый каркас рамки обеспечивает хорошее успокоение подвижной части. В гальванометрах высшей чувствительности с зеркальным отсчетом необходимость иметь большое число витков рамки и малый воздушный зазор заставляет применять бескаркасную рамку. В этом случае при известных условиях роль успокоителя может выполнять обмотка рамки, обеспечивая хорошее успокоение подвижной части гальванометра и, следовательно, возможность быстро производить отсчет измеряемой величины. В других условиях тот же гальванометр будет иметь плохое успокоение.

При включении гальванометра в цепь тока по его обмотке проходит измеряемый ток, и подвижной части сообщается некоторое количество энергии. Благодаря этому возникают электромагнитные силы, создающие вращающий момент, который стремится установить рам-

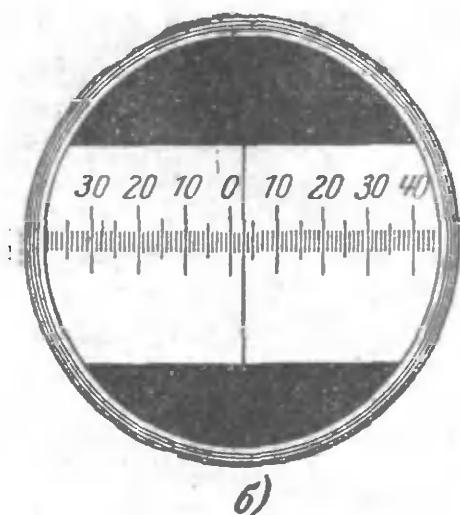
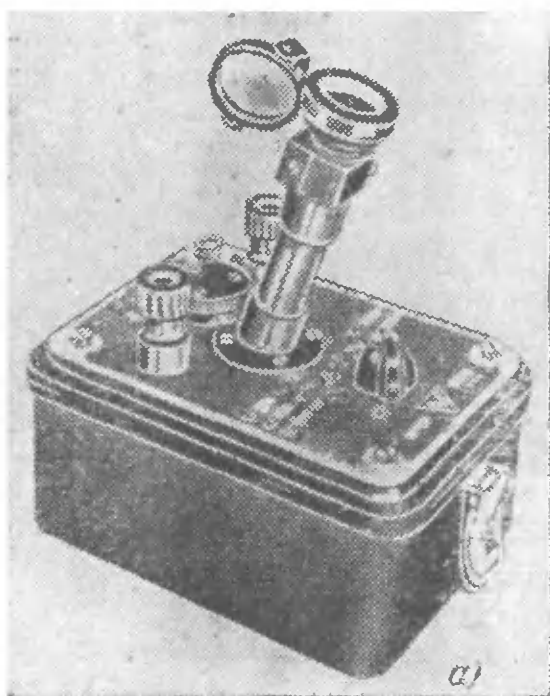


Рис. 5-17.

а — гальванометр с субъективным отсчетом; *б* — вид шкалы через зрительную трубу.

ку в положение, при котором она будет обладать наибольшим запасом энергии.

Но при движении рамки гальванометра, с одной стороны, происходит преобразование полученной энергии в кинетическую энергию, а с другой стороны, в потенциальную энергию закручивания подвеса. Наконец, при движении рамки имеют место потери энергии на трение рамки о воздух и на электромагнитное торможение. Это торможение заключается в том, что при движении рамки в магнитном поле в ней наводится э. д. с. (рамка становится источником э. д. с.), под действием которой в цепи гальванометра, если она замкнута, проходит ток. Взаимодействие этого тока с полем постоянного магнита и создает торможение. Прохождение этого тормозного тока по цепи гальванометра связано с потерями энергии

на нагревание этой цепи (потери на электромагнитное торможение).

В зависимости от соотношений между величинами момента инерции подвижной части, удельного противодействующего момента, магнитной индукции, площади рамки, числа витков рамки и сопротивления цепи галь-

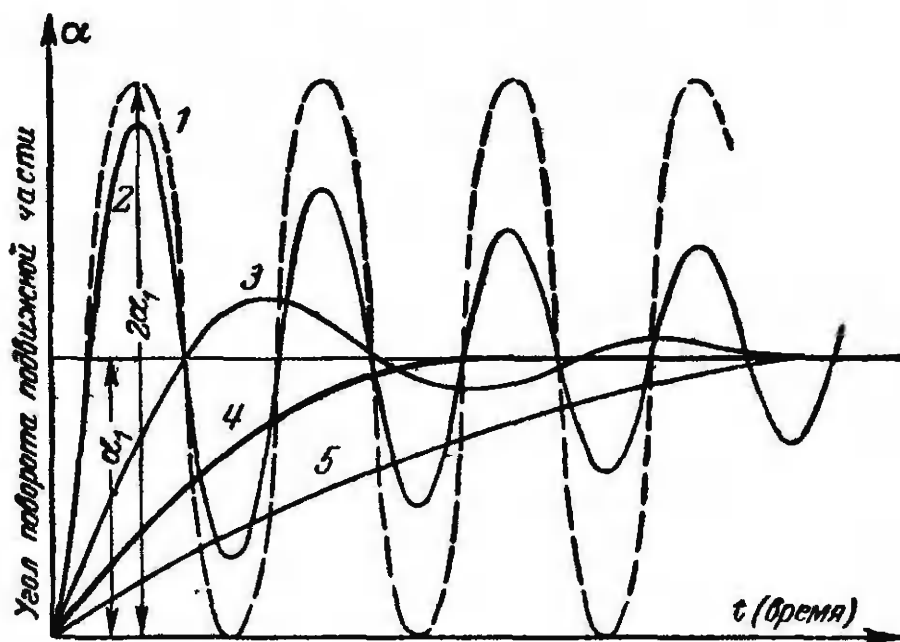


Рис. 5-18. Кривые движения подвижной части гальванометра при его включении.

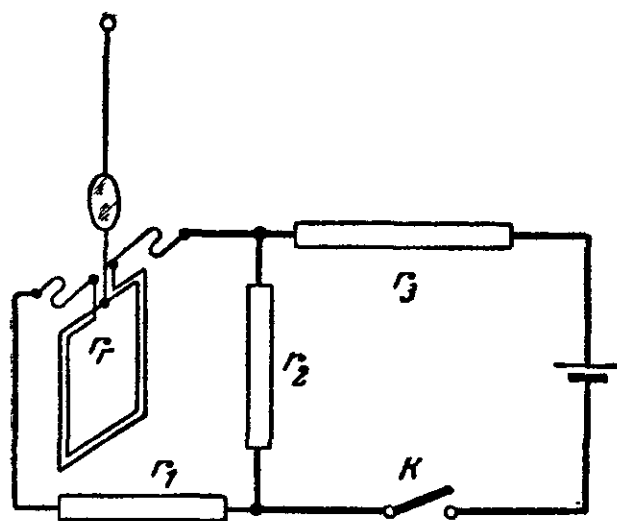
ванометра будут иметь место различный характер передвижения подвижной части гальванометра и различное время успокоения.

После включения гальванометра в цепь тока подвижная часть его достигает нового положения равновесия, в одном случае совершая ряд затухающих колебаний (кривые 2 и 3, рис. 5-18), в другом случае без колебаний — апериодически (кривые 4 и 5).

Пунктирная кривая 1 показывает идеальный случай — при отсутствии трения и электромагнитного торможения. В этом случае подвижная часть после включения гальванометра в цепь отклоняется под действием вращающего момента на угол α_1 , при котором $M = M_{пр}$.

Но так как к этому положению равновесия подвижная часть подошла с некоторой скоростью, то, следовательно, она обладает некоторой кинетической энергией. За счет этой энергии подвижная часть продолжит свое движение в ту же сторону, пока эта энергия не превра-

тится в потенциальную (подвес закручен). При этом подвижная часть будет отклонена на угол $2\alpha_1$. После этого под влиянием потенциальной энергии пружин она начнет обратное движение и подойдет с некоторой скоростью к положению равновесия α_1 . Затем под влиянием кинетической энергии подвижная часть перейдет это положение равновесия, дойдет до исходного положения, и процесс начнет повторяться. Следовательно, подвижная



ная часть гальванометра после включения его в цепь совершает незатухающие колебания с периодом T_0 .

При наличии трения рамки о воздух и отсутствии электромагнитного торможения, т. е. при сопротивлении цепи гальванометра, равном бесконечности, подвижная часть после включения гальванометра подойдет к положению равнове-

Рис. 5-19. Рамка зеркального гальванометра в электрической цепи.

сия, определяемому равенством моментов $M = M_{\text{пр}}$, через длинный ряд слабо затухающих колебаний (кривая 2, рис. 5-18).

Уменьшая сопротивление, на которое замкнут гальванометр (сопротивления r_1 и r_2 на рис. 5-19), мы увеличиваем ток, вызывающий торможение рамки, а следовательно, увеличиваем само торможение, т. е. замедляем движение рамки. При этом увеличивается затухание колебаний и уменьшается время успокоения (кривая 3, рис. 5-18).

Уменьшая сопротивление, на которое замкнут гальванометр, можно найти такое его значение, при котором движение подвижной части гальванометра будет уже аperiодическим, а время успокоения — наименьшим (кривая 4, рис. 5-18).

При дальнейшем уменьшении сопротивления сохраняется аperiодический характер движения рамки, происходит дальнейшее замедление ее движения и увеличивается время успокоения (кривая 5, рис. 5-18).

То наибольшее сопротивление, при замыкании на которое подвижная часть гальванометра движется аperiodически, называется внешним критическим сопротивлением гальванометра, а сам гальванометр — критически успокоенным. Сопротивление, равное сумме внешнего критического сопротивления и сопротивления самого гальванометра, называется полным критическим сопротивлением гальванометра.

При замыкании гальванометра на сопротивление, большее его внешнего критического, движение подвижной части будет колебательным — гальванометр недоуспокоен.

Для быстроты производства измерений следует работать или с критически успокоенным, или лучше с несколько недоуспокоенным гальванометром.

Не приводя доказательства ввиду его громоздкости, отметим, что полное критическое сопротивление

$$r_{\text{кр.полн}} = \frac{B^2 S^2 w^2}{2 \sqrt{JD}}, \quad (5-13)$$

где J — момент инерции подвижной части гальванометра.

Таким образом, для каждого гальванометра при неизменной магнитной индукции в его воздушном зазоре критическое сопротивление является постоянной величиной, которая обычно и указывается заводом. При изменении магнитной индукции в зазоре гальванометра, например при применении магнитного шунта, критическое сопротивление гальванометра изменяется.

Если при использовании гальванометра для измерений тока мы характеризовали гальванометр его постоянной по току $C_I = I/\alpha$ или его чувствительностью к току $S_I = 1/C_I = \alpha/I$, то при использовании гальванометра для измерения напряжения или э. д. с. его следует характеризовать постоянной по напряжению $C_U = U_r/\alpha$ или его чувствительностью к напряжению

$$S_U = \frac{\alpha}{U_r}. \quad (5-14)$$

Напряжение на зажимах гальванометра

$$U_r = I r_r,$$

поэтому

$$S_U = \frac{\alpha}{U_r} = \frac{\alpha}{I r_r} = \frac{S_I}{r_r}. \quad (5-15)$$

Так как рекомендуется работать с критически успокоенным гальванометром (или несколько недоуспокоенным гальванометром), то больший практический интерес представляет величина

$$S'_U = \frac{S_I}{r_{кр \text{ полн}}} = \frac{\alpha}{I r_{кр \text{ полн}}}. \quad (5-16)$$

Поэтому в большинстве случаев под чувствительностью гальванометра по напряжению понимают отношение угла поворота его подвижной части или числа миллиметров шкалы, на которое перемещается световой зайчик, к единице напряжения (э. д. с.), действующей в цепи критически успокоенного гальванометра.

Из сказанного также следует, что чувствительность гальванометра к напряжению равна его чувствительности к току, деленной на критическое сопротивление гальванометра.

Чувствительность гальванометра к току изменяется пропорционально произведению BSw [см. (5-9)], а критическое сопротивление гальванометра изменяется пропорционально второй степени произведения BSw [см. (5-13)]; поэтому увеличение чувствительности к току за счет увеличения произведения BSw приводит к уменьшению чувствительности к напряжению [см. (5-16)].

Таким образом, большей чувствительностью к напряжению обладают гальванометры с меньшей чувствительностью к току и меньшим критическим сопротивлением.

С другой стороны, чувствительность гальванометра к току увеличивается обратно пропорционально первой степени удельного противодействующего момента [см. (5-9)], а критическое сопротивление гальванометра увеличивается обратно пропорционально корню квадратному из удельного противодействующего момента [см. (5-13)]; следовательно, чувствительность гальванометра к напряжению (5-16) можно увеличить, уменьшая удельный противодействующий момент.

б) Дифференциальный гальванометр

Дифференциальный гальванометр отличается от ранее рассмотренных гальванометров только тем, что он имеет не одну, а две одинаковые обмотки.

При прохождении по обмоткам токов I_1 и I_2 в разных направлениях вращающий момент и угол поворота подвижной части будут пропорциональны разности токов, т. е.

$$\Delta I = I_1 - I_2 = C_I \alpha. \quad (5-17)$$

При равенстве токов I_1 и I_2 угол поворота подвижной части гальванометра будет равен нулю.

Дифференциальные гальванометры применяются для сравнения величин токов в двух независимых электрических цепях и используются главным образом для измерения сопротивлений.

в) Баллистический гальванометр

Отличие баллистического гальванометра от гальванометра для измерения тока заключается только в том, что он обладает значительно большим периодом колебания подвижной части, порядка 20 сек. Увеличение периода незатухающих колебаний подвижной части $T_0 = 2\pi \sqrt{J/D}$ достигается увеличением ее момента инерции J . Это увеличение получается за счет увеличения массы подвижной части гальванометра, которая в этом случае снабжается двумя или четырьмя грузиками, как это показано на рис. 5-20.

Если через рамку баллистического гальванометра в течение времени t протечет количество электричества

$$Q = \int_0^t i_r dt, \text{ то от взаимодействия тока } i_r \text{ с магнитным}$$

полем магнита рамка получит импульс силы $\int_0^t F dt$.

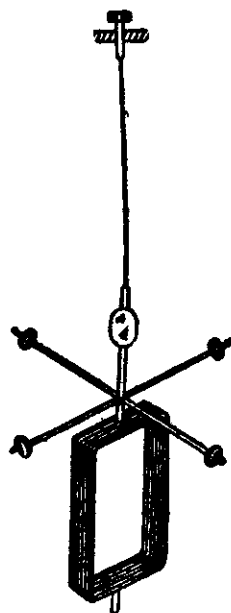


Рис. 5-20.
Подвижная часть баллистического гальванометра.

Под влиянием этого импульса подвижная часть будет отброшена на некоторый угол α_k (рис. 5-21), после чего возвратится в начальное положение, совершая ряд затухающих колебаний или аperiодически. Можно доказать, что отброс подвижной части (угол α_k) будет пропорционален количеству электричества, протекающе-

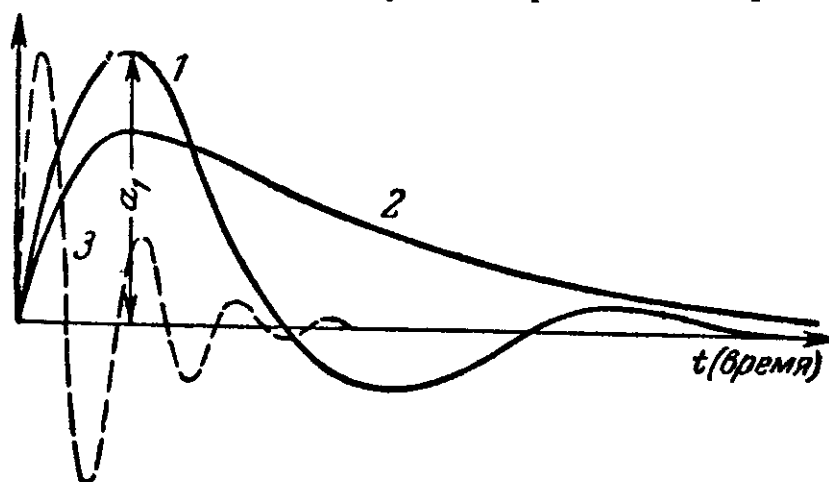


Рис 5-21. Кривые движения подвижной части баллистического гальванометра.

1 и 2 — при различных успокоениях, 3 — с малым периодом колебаний

му через гальванометр, если продолжительность прогекания его будет меньше одной десятой периода колебания гальванометра. Следовательно,

$$Q = C_q \alpha_k. \quad (5-18)$$

Здесь $C_q = \frac{Q}{\alpha_k}$ — баллистическая постоянная гальванометра — количество электричества, соответствующее отбросу подвижной части гальванометра на 1 мм шкалы.

Таким образом, по углу отклонения α_k можно определять количество электричества, протекающее через гальванометр.

Величина, обратная постоянной, называется баллистической чувствительностью гальванометра:

$$S_q = \frac{1}{C_q} = \frac{\alpha_k}{Q}. \quad (5-19)$$

Из сказанного выше следует, что при данной длительности прохождения количества электричества через гальванометр для получения надлежащей точности из-

мерения следует брать гальванометр с достаточно большим периодом колебания, значительно превышающим длительность импульса.

С другой стороны, большой период колебания нужен потому, что при баллистических измерениях измеряемая величина отсчитывается по первому наибольшему отбросу гальванометра. Время, в течение которого подвижная часть находится в отклоненном состоянии, составляет незначительную часть периода, и следовательно, при малой длительности периода колебания мы не в состоянии будем произвести отсчет.

Баллистическая постоянная критически успокоенного гальванометра C_q может быть определена по формуле

$$C_q = C_I \frac{T_0}{2\pi} e = \frac{1}{S_I} \frac{T_0}{2\pi} e, \quad (5-20)$$

где S_I — чувствительность гальванометра к току;

T_0 — время полного периода колебаний при разомкнутой внешней цепи гальванометра;

$e \approx 2,72$.

г) Примеры гальванометров постоянного тока

На рис. 5-22 схематически показано устройство зеркального гальванометра с магнитным шунтом. В воздушном зазоре помещается рамка с зеркальцем $З$, укреп-

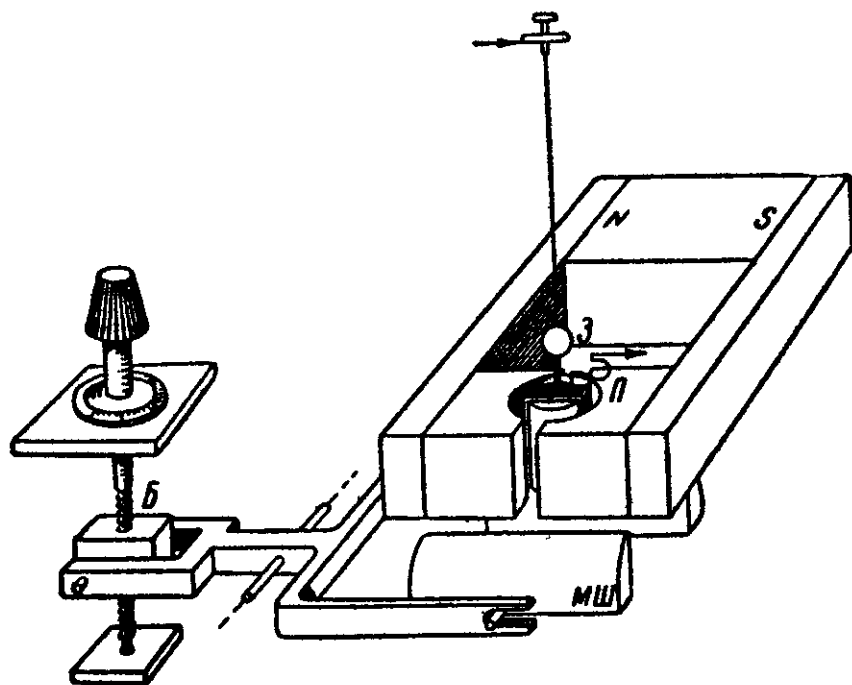


Рис. 5-22 Зеркальный гальванометр типа М17.

появляющиеся на подвесе. Ток к рамке подводится через подвес и подводку *П* — гибкую безмоментную ленточку. Магнитную индукцию в воздушном зазоре можно регулировать при помощи магнитного шунта *МШ*, перемещая его в вертикальном направлении при помощи винта *В*. Завод «Вибратор» выпускает единую серию стационарных гальванометров типа М17, основные параметры которых приведены в табл. 5-1.

Таблица 5-1

Основные параметры гальванометров М17

Тип	r_r ом	r_k ом	C_I $\alpha/\text{мм/м} \times 10^{-9}$	C_U $\beta/\text{мм/м} \times 10^{-6}$	C_q $\kappa/\text{мм/м} \times 10^{-9}$	C_Φ $\phi\beta/\text{мм/м} \times 10^{-6}$	T_0 сек
М17/1	12	40	3,2	0,17	—	—	6
М17/4	35	630	2	1,2	—	—	4
М17/5	70	1 600	1,2	2,0	—	—	4
М17/7	350	10 000	0,5	5,0	—	—	4
М17/10	2 500	160 000	0,02	3,0	—	—	13
М17/11 { I обмотка II обмотка	15 300	40 1 600	1,8 0,3	0,1 —	— 3	1,0 —	20
М17/12	20	250	0,4	0,1	—	0,8	18
М17/13 { I обмотка II обмотка	15 4 000	100 63 000	1,4 0,06	0,7 —	— 0,5	1,4 —	18
М17/14 дифференциальный	2×100	1 600	1	1,6	—	—	5

Примечания: 1. Значения r_k , C_I и C_U даны для положения магнитного шунта „выведен“.
2. При введенном положении магнитного шунта C_I и C_U увеличиваются примерно в 3 раза, а r_k значительно уменьшается.

Такие гальванометры применяются в компенсационных схемах в качестве измерителей, показывающих наличие или отсутствие тока, в качестве приборов для измерения тока, напряжения, количества электричества,

магнитного потока и для сравнения величин двух токов (М17/14). Комплектно с гальванометром поставляется осветитель ПЗ1.

На рис. 5-23 показан переносный магнитоэлектрический многопредельный гальванометр для нулевых измерений типа М-195 со световым указателем. Внутреннее сопротивление гальванометров М-195 1, 2 и 3 соответственно 50, 150 и 1700 ом, внешнее критическое сопро-

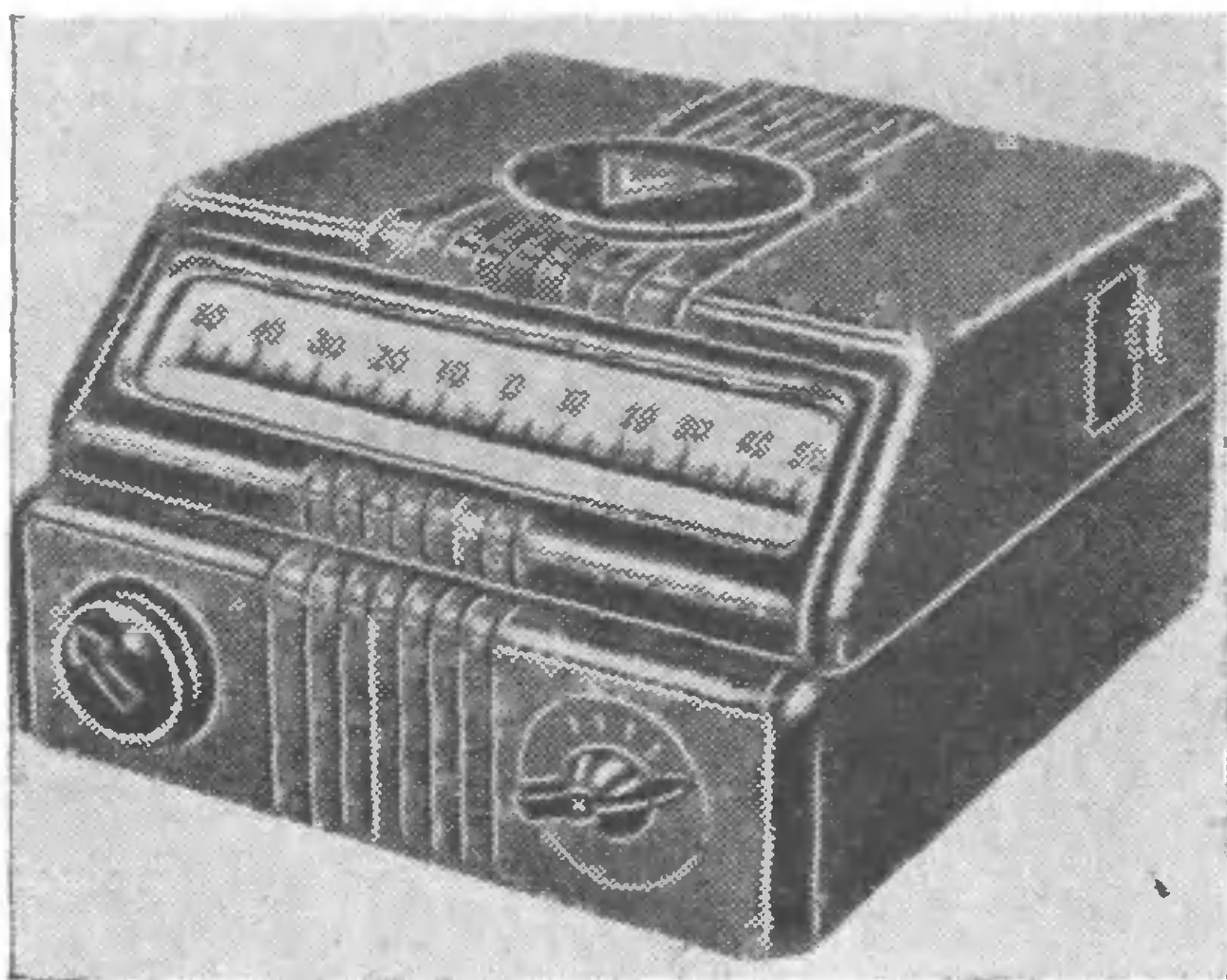


Рис. 5-23. Магнитоэлектрический гальванометр типа М-195 со световым указателем.

тивление — 300, 3 000 и 15 000 ом; постоянная по току — $C_I = 12; 4,6; 1,8 \times 10^{-9}$ а/дел, период свободных колебаний — 3 сек.

Гальванометры М-195 имеют встроенный шунт, увеличивающий основную цену деления (C_I) в 10 и 100 раз.

На рис. 5-24 дана принципиальная схема гальванометра. Для исключения токов утечки, могущих изменить результат измерения, гальванометр снабжен экраном. Зажим «экран» соединяется с одним из зажимов прибора.

Промышленностью выпускаются также переносные гальванометры М-196 (рис. 5-17,а) с субъективным отсчетом, а также гальванометры М-197 для измерения электрического заряда и магнитного потока. Гальванометры типа М-197 переносные баллистические. В галь-

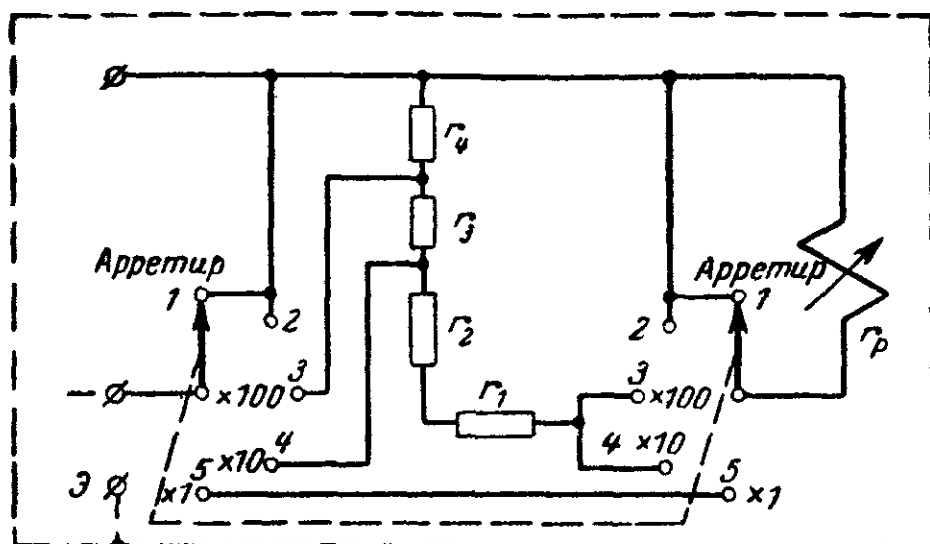


Рис. 5-24. Принципиальная схема гальванометра типа М-195.

ванометрах М-196 с внутрирамочным магнитом подвижная часть выполнена на растяжках (рис. 4-5,б), схема внутренних соединений гальванометра М-196 аналогична схеме рис. 5-24.

В табл. 5-2 даны основные параметры гальванометров М-196 и М-197.

Таблица 5-2

Основные параметры переносных гальванометров
М-196 и М-197

Параметры	М-196/1	М-196/2	М-197/1	М-197/2
Внутреннее сопротивление, ом	1 000	5	800	15
Внешнее критическое сопротивление, ом	3 000	5	1 000	10
Постоянная по току, а/дел $\times 10^{-8}$	0,4	8	—	—
Постоянная по напряжению, в/дел $\times 10^{-6}$	16	0,8	—	—
Постоянная по количеству электричества, к/дел $\times 10^{-7}$	—	—	5	0,5
Постоянная по магнитному потоку, вб/дел $\times 10^{-8}$	—	—	5	0,5
Период свободных колебаний, сек	1,5	1,5	—	—

д) Вибрационные (резонансные) гальванометры

Вибрационный (резонансный) гальванометр магнитоэлектрической системы типа М-501, выпускаемый в СССР (рис. 5-25), имеет неподвижный электромагнит и подвижную часть, состоящую из маленького магнита

1, укрепленного на растяжках. Противодействующий момент создается растяжками и полем вспомогательного постоянного магнита 2 с полюсными наконечниками $N'S'$. Поворотом вспомогательного магнита относительно полюсных наконечников можно изменять величину магнитной индукции между полюсными наконечниками $N'S'$ и тем самым производить настройку подвижной ча-

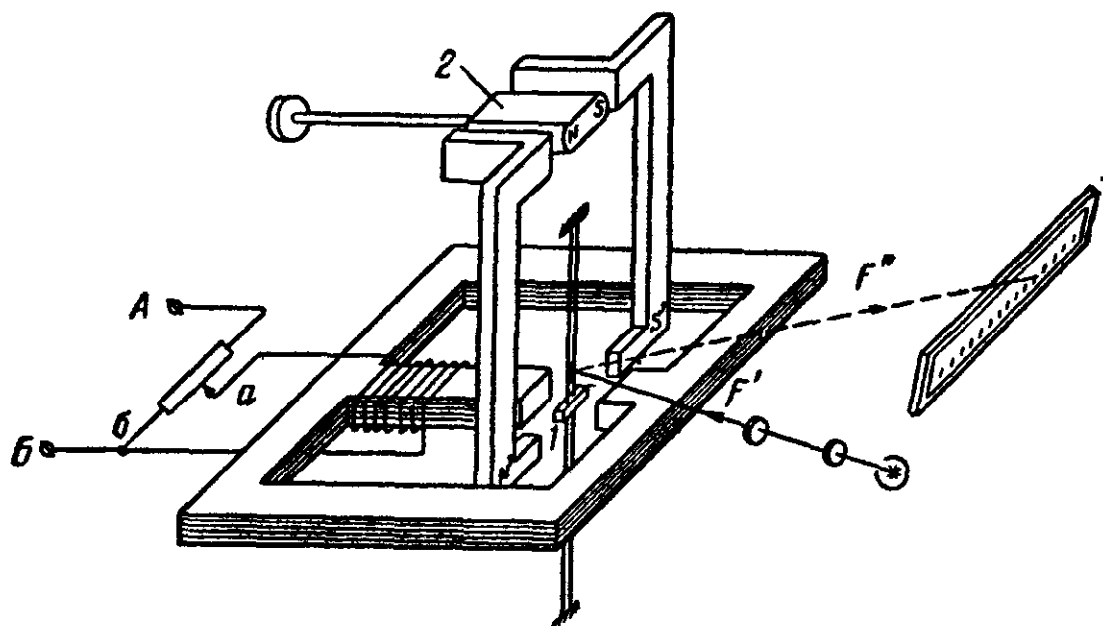


Рис. 5-25. Схема устройства вибрационного гальванометра с подвижным магнитом.

сти гальванометра в резонанс с частотой измеряемого тока, необходимой для получения высокой чувствительности.

Зажимы гальванометра AB соединены с делителем напряжения. Два зажима делителя ab присоединены к обмотке электромагнита. В зависимости от положения движка делителя большая или меньшая часть измеряемого тока проходит по обмотке электромагнита, создавая в воздушном зазоре его переменное магнитное поле, ось которого перпендикулярна оси подвижного магнита.

Вследствие взаимодействия магнитного поля, созданного измеряемым током, с подвижным магнитом на последний будет действовать вращающий момент, значение которого пропорционально мгновенному значению тока. Под действием этого вращающего момента подвижный магнит будет колебаться с амплитудой, зависящей от величины измеряемого тока. Отраженный от зеркала, укрепленного на растяжках, луч света дает

на шкале светлую полосу, по ширине которой можно судить о величине измеряемого переменного тока. Осветитель с лампой и шкала помещаются в кожухе прибора.

Гальванометр предназначен в качестве нулевого прибора в компенсационных и мостовых схемах переменного тока частотой от 30 до 100 гц.

Постоянная гальванометра по току $C_I = 16 \cdot 10^{-5}$ а/мм, по напряжению $C_U = 2,2 \cdot 10^{-5}$ в/мм.

е) Выбор гальванометра

Каждый гальванометр может быть использован в самых разнообразных случаях измерения, но он будет наиболее подходящим только для какого-либо определенного рода измерения в зависимости от его чувствительности, периода колебаний, сопротивления гальванометра и внешнего критического сопротивления. Чувствительность гальванометра не должна быть больше действительно необходимой, так как излишняя чувствительность затрудняет работу.

Гальванометр для измерения тока и напряжения должен иметь период незатухающих колебаний порядка 2—8 сек, а баллистический — порядка 15—30 сек.

Для каждой схемы гальванометр должен подбираться с таким расчетом, чтобы была обеспечена работа его в условиях, близких к критическому успокоению.

При подборе гальванометра для измерения малых токов в цепях с большими сопротивлениями (например, измерение сопротивления изоляции) следует выбирать гальванометр с большой чувствительностью к току, с большим внешним критическим и собственным сопротивлениями.

При выборе гальванометра для измерения малых сопротивлений по схеме одинарного или двойного моста, а также потенциометров, следует выбирать гальванометры с малым критическим и собственным сопротивлением, малой чувствительностью к току и большой чувствительностью к напряжению.

Для измерения незначительных э. д. с. (например, термо-э. д. с.) следует брать гальванометры с большой чувствительностью к напряжению.

Для баллистических измерений, например для измерений емкости, следует брать гальванометр с большим периодом колебаний и большим критическим сопротивлением.

По табл. 5-1 и 5-2 можно, пользуясь указаниями по выбору гальванометров, подобрать наиболее подходящий.

ж) Гальванометрические усилители

С помощью обычных (зеркальных) гальванометров измеряют весьма малые токи и напряжения. Номинальный ток и номинальное напряжение для современных гальванометров соответственно составляют (например, для гальванометров типа М17): $I_{\text{ном}} = 1 \times 10^{-9}$ а; $U_{\text{ном}} = 1 \times 10^{-6}$ в.

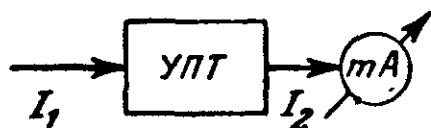


Рис. 5-26. Структурная схема гальванометра с усилителем постоянного тока.

В технике электрических измерений возникает необходимость измерять токи и напряжения в тысячи и десятки тысяч раз меньше. В таких случаях цепь гальванометра подключается через усилитель постоянного тока (УПТ). Но так как на выходе усилителя можно получить ток в несколько миллиампер, то в практике вместо гальванометра используется как выходной прибор обычный миллиамперметр. Совокупность УПТ — миллиамперметр (рис. 5-26) выполняет роль высокочувствительного гальванометра. Помимо того, что выходной ток усилителя I_2 может значительно превосходить по величине измеряемый I_1 , такая схема выгодно отличается от обычной схемы применения гальванометра тем, что входное сопротивление УПТ (например, лампового усилителя) может быть очень большим (до 10^{15} ом). Последнее очень ценно при измерениях в цепях с большим сопротивлением, например в схемах с полупроводниками, электронными лампами, так как подключение прибора с весьма малой мощностью потерь не меняет режима работы цепи.

Электронные усилители в сочетании со стрелочным указателем применяются в электроизмерительной технике — в приборах очень высокой чувствительности и

в приборах с большим входным сопротивлением. Подробно они рассматриваются в специальных курсах электронных измерительных приборов.

На рис. 5-27 схематически представлена работа гальванометрического усилителя. Ток I_1 — входная величина,

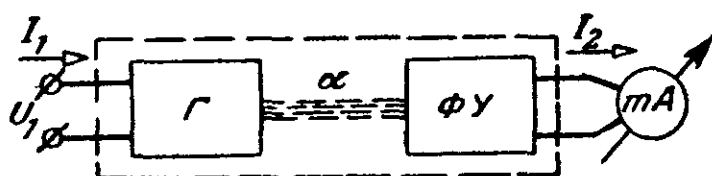


Рис. 5-27. Схема гальванометрического усилителя,

вызывает отклонение светового указателя гальванометра Γ на величину

$$a = S_I I_1.$$

Перемещение светового луча по светочувствительной поверхности фотоприбора ФУ вызывает появление тока I_2 , пропорционального a ,

$$I_2 = C_I a.$$

Чувствительность гальванометра к току $S_I = \frac{a}{I_1}$, представляя собой отношение выходной величины (отклонение светового указателя) к входной, является коэффициентом преобразования для первого каскада схемы. Аналогично для второго каскада схемы — фотоприбора коэффициент преобразования $C_I = I_2/a$ есть отношение выходной величины к входной.

Если сравнить между собой значения I_1 и I_2 , то прибор в целом представит собой усилитель тока с коэффициентом усиления

$$\frac{I_2}{I_1} = S_I C_I.$$

В схеме прибора (рис. 5-27) удастся получить общий коэффициент усиления $S_I C_I = 10^5 - 10^6$. Однако вследствие влияния внешних факторов (изменение температуры среды, колебания напряжения на лампе осветителя и др.) коэффициент усиления сильно изменяется. Точность такого прибора низкая,

Для повышения точности с одновременным уменьшением чувствительности применяются гальванометрические усилители с более сложными схемами. Рассмотрение таких устройств выходит за рамки настоящего учебника. Но в § 5-4 (Термоэлектрические приборы) одна из схем вольтметра иллюстрирует работу прибора с фотокомпенсационным усилителем.

Завод «Вибратор» выпускает фотоэлектрические усилители типа Ф117, предназначенные для усиления малых постоянных токов и напряжений. Такой усилитель представляет собой сочетание гальванометра на растяжках, оптической системы и дифференциального фотосопротивления. Усилители изготавливаются в десяти вариантах исполнения с коэффициентом усиления по току от $14 \cdot 10^3$ до $340 \cdot 10^3$.

5-3. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Приборы выпрямительной системы представляют собой сочетание измерительного механизма магнитоэлектрической системы с одним или несколькими полупроводниковыми выпрямителями. Применяются меднозакисные (купроксные) и германиевые выпрямители.

Отношение прямого тока к обратному или отношение обратного сопротивления к прямому называется коэффициентом выпрямления

$$k_v = \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{обр}}} = \frac{r_{\text{обр}}}{r_{\text{пр}}}.$$

Коэффициент выпрямления зависит от величины напряжения и от температуры. С возрастанием напряжения k_v увеличивается, с повышением температуры — уменьшается.

Выпрямительные приборы бывают с однополупериодным и двухполупериодным выпрямлением.

На рис. 5-28 показаны схемы с однополупериодным выпрямлением. В схеме B_1 и B_2 — выпрямители, один из которых включен последовательно с измерительным механизмом, другой — последовательно с сопротивлением, равным сопротивлению измерительного механизма. Ток через измерительный механизм идет в течение одной половины периода, что равноценно снижению чувстви-

тельности измерительного механизма. Чтобы не нарушать режим работы всей цепи, параллельно первому включен выпрямитель B_2 , через который идет ток во вторую половину периода.

В схеме на рис. 5-28,б измерительный механизм под-

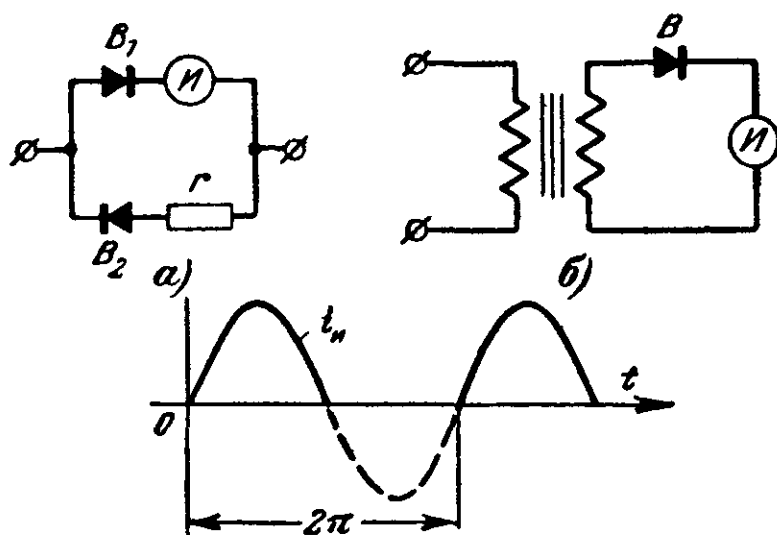


Рис. 5-28. Схемы с однополупериодным выпрямлением и кривая тока измерительного механизма.

ключен к вторичной обмотке трансформатора, и через него проходит только одна полуволна тока.

На рис. 5-29 дана весьма распространенная мостовая схема с двухполупериодным выпрямлением. Здесь в ге-

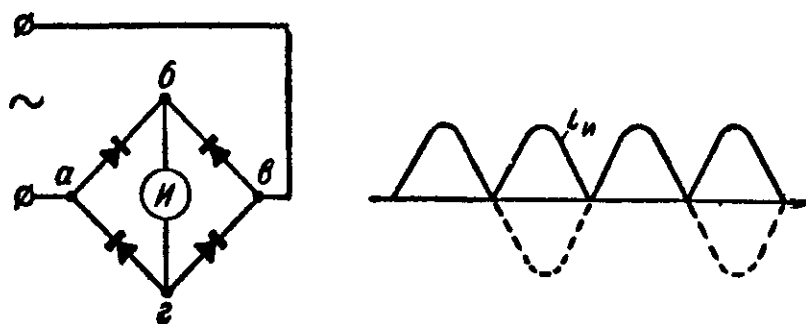


Рис. 5-29. Схема с двухполупериодным выпрямлением и кривая тока измерительного механизма.

чение первого полупериода ток идет в направлении $абгв$, в течение второго полупериода — в направлении $вбга$, т. е. через измерительный механизм в течение периода проходят две полуволны тока одного направления.

Мгновенное значение вращающего момента, действующего на подвижную часть измерительного механизма, можно выразить так:

$$M = BiS\omega.$$

Угол поворота подвижной части пропорционален среднему значению вращающего момента за период. При однополупериодном выпрямлении этот момент

$$M_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} M dt = BS\omega \frac{1}{T} \int_0^{T/2} i dt = BS\omega \frac{I_{\text{ср}}}{2},$$

откуда

$$BS\omega \frac{I_{\text{ср}}}{2} = D\alpha$$

и угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{BS\omega}{D} \frac{I_{\text{ср}}}{2}.$$

При двухполупериодном выпрямлении

$$M_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} M dt = BS\omega I_{\text{ср}}$$

и угол поворота

$$\alpha = \frac{BS\omega}{D} I_{\text{ср}}.$$

Так как на шкалах приборов наносятся действующие значения тока, то, приняв во внимание, что $I/I_{\text{ср}} = k_{\Phi}$, получим для первой схемы

$$\alpha = \frac{BS\omega}{2k_{\Phi}D} I;$$

для второй

$$\alpha = \frac{BS\omega}{k_{\Phi}D} I. \quad (5-21)$$

Таким образом, приборы, проградуированные при синусоидальной форме кривой тока, для которой $k_{\Phi} = 1,11$, будут давать неправильные показания при другой форме кривой измеряемого тока.

В выпрямительных приборах, так же как и в магнитоэлектрических, для расширения пределов измерения применяются шунты и добавочные сопротивления.

Сопротивление выпрямителей уменьшается на 1,5—4% при повышении температуры на 1°С.

В вольтметрах с малым добавочным сопротивлением изменение сопротивления выпрямителей влияет на

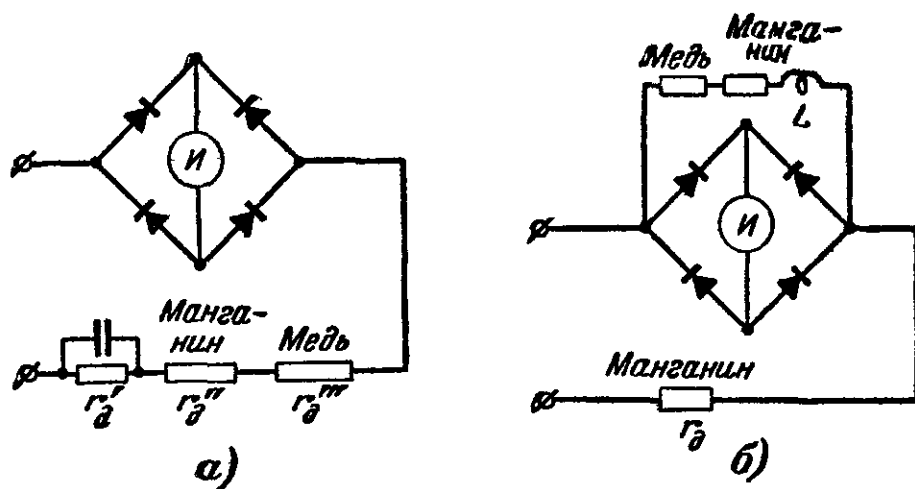


Рис 5-30 Схема температурной и частотной компенсации у детекторных вольтметров.

а — на малые напряжения; б — на большие напряжения.

эквивалентное сопротивление прибора. Для устранения этого влияния часть добавочного сопротивления выполняется из манганина, другая часть его — из меди с таким расчетом, чтобы при повышении температуры уменьшение сопротивления выпрямителей компенсировалось увеличением добавочного сопротивления.

В вольтметрах с большим добавочным сопротивлением изменение сопротивления выпрямителя мало влияет на эквивалентное сопротивление прибора. В этих вольтметрах повышение температуры приводит к уменьшению показаний за счет уменьшения коэффициента выпрямления. Для устранения этого влияния включают шунт (рис. 5-30), часть которого выполнена из меди, а другая — из манганина. В этом случае повышение температуры вызывает увеличение сопротивления шунта, что приводит к увеличению тока в измерительном механизме, компенсирующего влияние уменьшения коэффициента выпрямления.

В амперметрах для компенсации влияния уменьше-

ния коэффициента выпрямления также применяются шунты из меди и манганина (рис. 5-31).

Так как выпрямитель обладает емкостью, которую можно рассматривать включенной параллельно активному сопротивлению выпрямителя, то при увеличении частоты возрастает та часть тока, которая идет через емкость, не подвергаясь выпрямлению; следовательно, показания прибора будут уменьшаться (рис. 5-31).

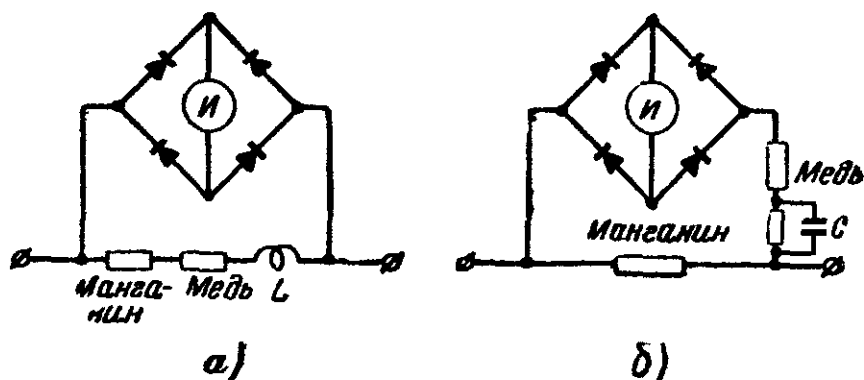


Рис 5-31. Схема температурной и частотной компенсации у детекторных амперметров.

а — на малые токи, *б* — на большие токи.

Для уменьшения влияния частоты у вольтметров часть добавочного сопротивления шунтируется емкостью (рис. 5-30); у амперметров на малые пределы шунты выполняются с некоторой индуктивностью (рис. 5-31).

Применяя многопредельный шунт и добавочное сопротивление, можно получить выпрямительный прибор для измерения тока и напряжения с различными пределами измерений. Снабжая такой прибор переключателем, дающим возможность отключить выпрямляющее устройство, можно тот же прибор использовать в цепях постоянного тока.

В большинстве случаев выпрямительные приборы изготавливаются как многопредельные комбинированные ампервольтметры и имеют трехрядную шкалу: равномерную — для измерений постоянного тока и напряжения и неравномерную для других величин.

Приборы с меднозакисными выпрямителями обычно изготавливаются для цепей с частотой до 10 кГц.

Применение германиевых выпрямителей (рис. 5-32), обладающих очень малой емкостью и очень большим

коэффициентом выпрямления, а также большой устойчивостью своих характеристик по времени позволяет изготавливать измерительные приборы, пригодные для измерений в цепях с высокой частотой.

Промышленностью выпускаются многопредельные ампервольтметры Ц-315, предназначенные для измерения в цепях постоянного тока и переменного частотой от 45 до 1 000 гц; ампервольтметры Ц-51 также мно-

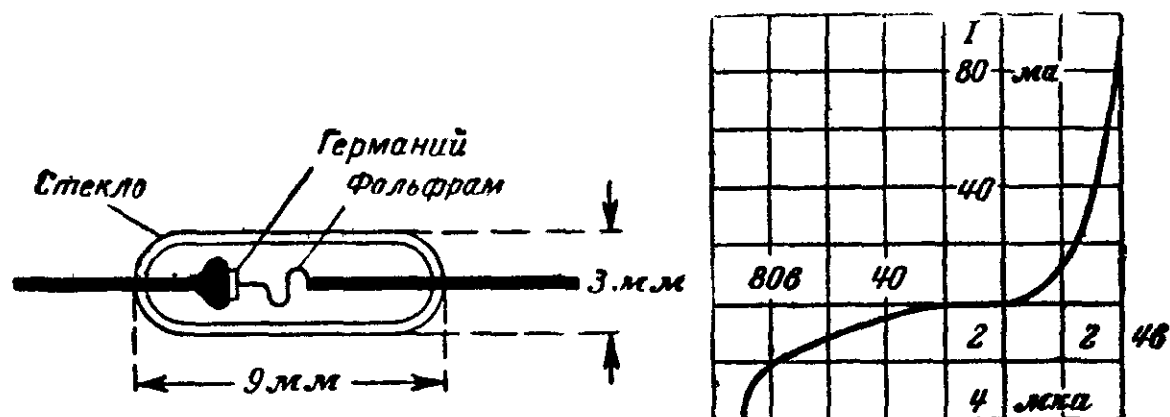


Рис. 5-32. Устройство германиевого выпрямителя и его вольт-амперная характеристика.

гопредельные, имеющие класс точности 1,0 на постоянном токе, 1,5 и 2,5 — на переменном токе частотой от 45 гц до 10 кгц.

Выпускаются щитовые вольтметры и амперметры выпрямительной системы типа Ц-25, Ц-26, Ц-27 на различные пределы по току и напряжению, предназначенные для применения в цепях переменного тока частотой 50 гц.

Завод «Вибратор» выпускает щитовые вольтметры выпрямительной системы типа Ц-211.

Приборы выпускаются на один или два предела измерения от 30 до 250 в при непосредственном включении и от 500 до 2 000 в при включении с измерительным трансформатором напряжения в цепях переменного тока частотой от 50 до 8 000 гц. Основная погрешность вольтметров Ц-211 и Ц-211Т — $\pm 2,5\%$ от верхнего предела измерения.

Положительные свойства выпрямительных приборов:

- 1) высокая чувствительность;
- 2) малая мощность потерь;
- 3) независимость показаний от частоты.

Отрицательные свойства:

- 1) невысокая точность (классы 1,5 и 2,5);
- 2) зависимость показаний от формы кривой измеряемой величины.

Выпрямительная система может быть использована для изготовления ваттметров и герцметров.

5.4. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Термоэлектрический прибор представляет собой сочетание измерительного механизма магнитоэлектрической системы с термопреобразователем.

Термопреобразователь состоит из одной или нескольких термопар и нагревателя (рис. 5-33). Измерительный

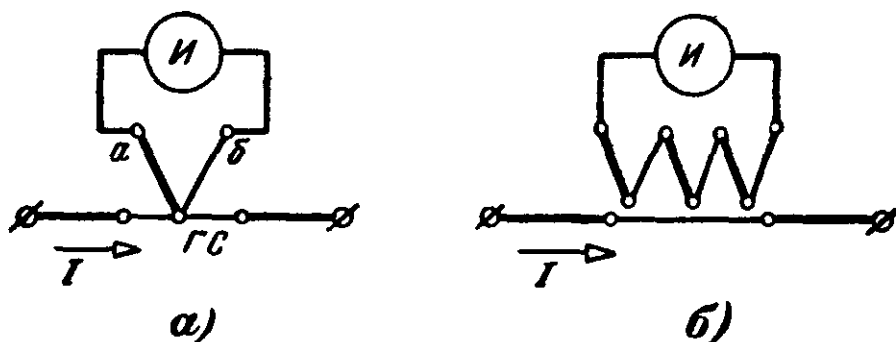


Рис. 5-33. Измерительный механизм с термопреобразователем.
а — соединенный с нагревателем (контактный); б — изолированный от нагревателя

механизм соединен со свободными концами термопары (холодные спай а и б), а горячий спай ее—гс—нагревается измеряемым током, проходящим через изолированный от термопары или соединенный с ней нагреватель.

Термо-э, д. с., возникающая между свободными концами термопары, вызовет прохождение тока через цепь измерительного механизма и поворот его подвижной части. Термо-э. д. с. примерно пропорциональна нагреву спая термопары, а последний пропорционален квадрату тока, следовательно, угол поворота подвижной части будет примерно пропорционален квадрату действующего значения измеряемого тока.

Нагреватель изготавливается из платиноиридиевой или константановой проволоки, а для термопар применяют:

железо — константан, манганин — константан, золото-палладий — платиноиридий и другие пары, дающие термо-э. д. с. порядка 50 мкв при нагреве на 1° С.

Для повышения чувствительности термopару и нагреватель помещают в стеклянную колбу, создавая в ней вакуум (вакуумный термоэлемент), благодаря чему, с одной стороны, уменьшается отдача тепла в окружающую среду, а с другой стороны, получается возмож-

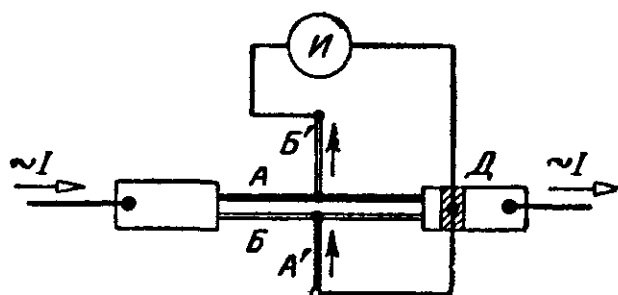


Рис. 5-34. Схема термоэлектрического амперметра.

ность достижения более высоких температур нагрева, что приводит к получению больших термо-э. д. с.

На рис. 5-34 дана схема термоэлектрического амперметра.

Измеряемый ток от одной колодки к другой проходит по двум па-

раллельно расположенным проводникам А и Б. К середине проводника А приварен проводник Б', а к середине проводника Б приварен проводник А'. Проводники А и А' изготовляются из золотопалладия, проводники Б и Б' — из платиноиридия. Таким образом, получаются две термопары, замкнутые на измерительный механизм, сумма термо-э. д. с. которых и вызывает ток в измерительном механизме.

Добавочная термопара Д, изолированная от колодки, на которой она укреплена, нагревается при повышении температуры колодки, давая добавочную термо-э. д. с. Эта добавочная термо-э. д. с. направлена встречно к основным термо-э. д. с., компенсируя их увеличение, вызванное большим повышением температуры рабочих концов по сравнению со свободными концами при длительном прохождении измеряемого тока.

В таком нагревателе (рис. 5-34) измеряемый ток, проходя по проводникам А и Б, в месте горячего спая не переходит от одного металла к другому. Поэтому нет дополнительного выделения или поглощения тепла (эффект Пельтье), и показания прибора не зависят от направления измеряемого тока.

Достоинством термоэлектрических приборов является то, что термопреобразователи обладают очень малой

Таблица 5-3

Тип прибора	Номинальный ток или напряжение	Класс	Род тока	Область частот, гц	
				Номинальная	Расширенная
Термоамперметр Т-14	4; 6; 10; 25; 40; 60 а	4	~	5·10 ² —30·10 ⁶	—
Термомиллиамперметр Т-15/1	5 ма 10 ма	1,0	≈	20—25·10 ⁶	75·10 ⁶
				20—25·10 ⁶	70·10 ⁶
Термомиллиамперметр Т-15	30; 50 ма 100 ма 300 ма	1,0	≈	20—20·10 ⁶	70·10 ⁶
					60·10 ⁶
					30·10 ⁶
Термовольтметр Т-16	0,75; 1,5; 3 в 7,5; 15; 30 в	1,5	≈	20—15·10 ⁶	30·10 ⁶
				50—2·10 ⁶	5·10 ⁶
Термоамперметр Т-18	0,5; 1,0; 2,5; 5,10; 15; 25 а	1,5	≈	50—2·10 ⁶	5·10 ⁶
С отдельным термопреобразователем Т-109, Т-110; Т-111	50 а			50—1·10 ⁶	2·10 ⁶

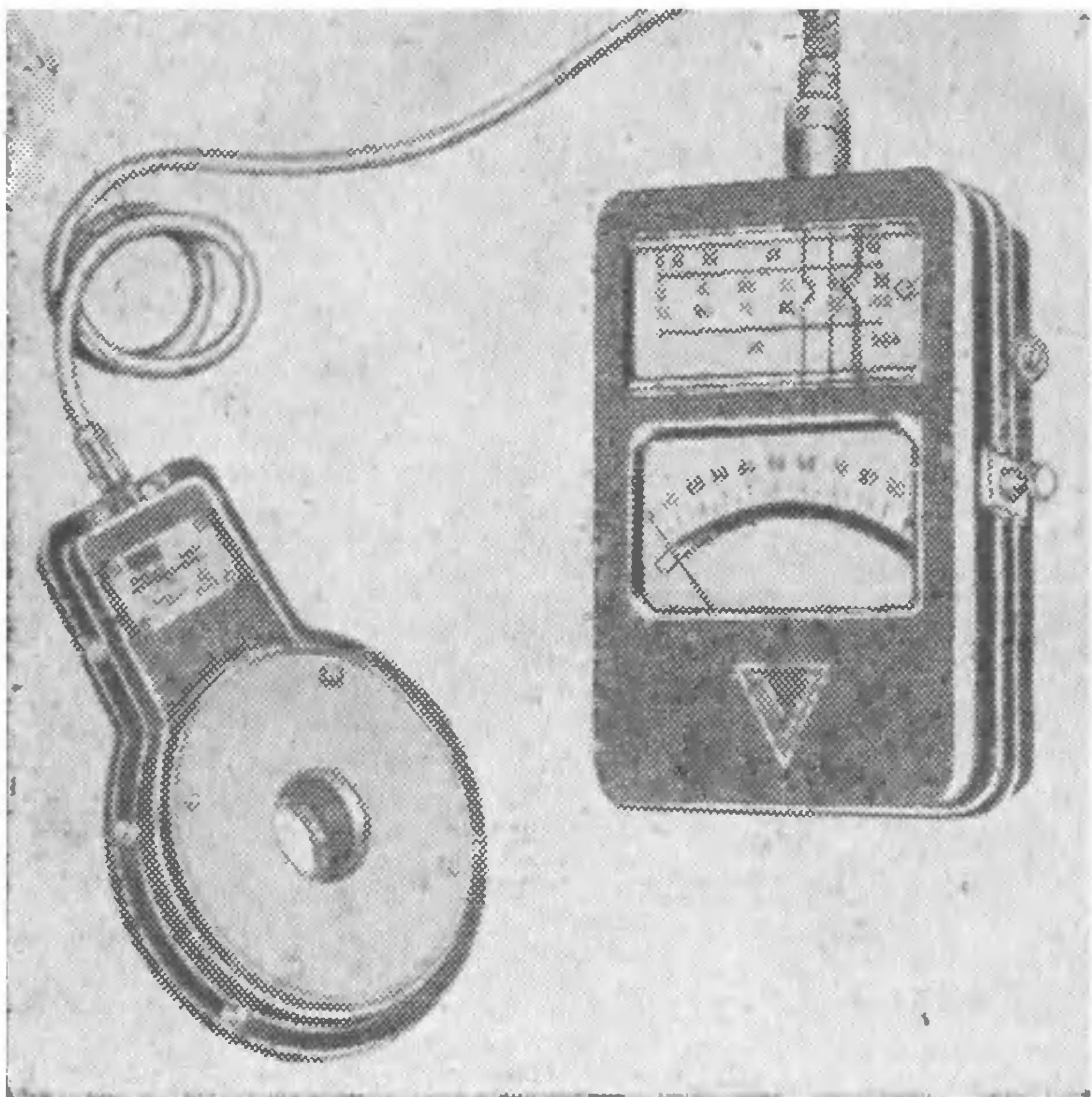


Рис. 5-35. Общий вид термоэлектрического амперметра типа Т-14 с комплектным трансформатором тока типа И-14.

индуктивностью и емкостью, благодаря чему показания приборов практически не зависят от частоты и формы кривой переменного тока. Термоэлектрические амперметры и вольтметры нашли широкое применение в цепях переменного тока высокой частоты и для различных радиоизмерений. Рассмотренные термоэлектрические приборы обладают недостатками: невысокой точностью и большой чувствительностью к перегрузкам, так как нагреватель работает при высокой температуре (200—300° С).

Завод «Вибратор» выпускает единую серию термоэлектрических амперметров и вольтметров, предназначенных для применения в цепях постоянного и переменного тока в широком диапазоне частот. Технические данные некоторых типов термоэлектрических приборов даны в табл. 5-3.

На рис. 5-35 показан общий вид термоэлектрического амперметра.

Термоамперметр Т-14 представляет собой переносный прибор с отдельным тороидальным трансформатором тока типа И-14 (см. гл. 7). Первичной обмоткой трансформатора служит провод с измеряемым током. Вторичная обмотка замкнута на нагреватель. Измерителем термоприбора является магнитоэлектрический

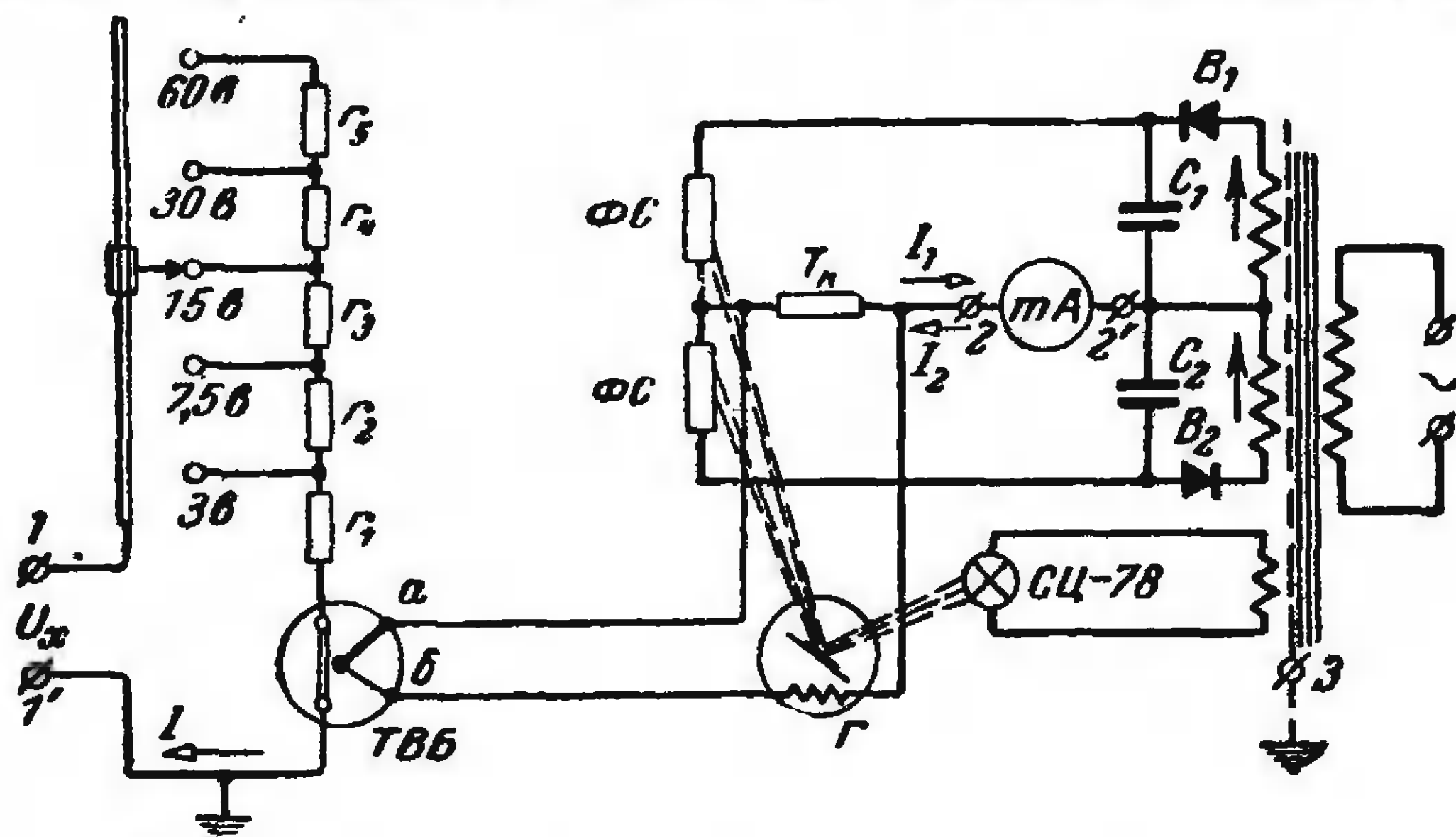


Рис. 5-36. Принципиальная схема термовольтметра с фотокомпенсационным усилителем.

стрелочный прибор с подвижной частью на растяжках. Для защиты прибора от влияния высокочастотных полей провод и корпус измерителя экранированы.

Термоамперметры Т-15 и термовольтметры Т-16 обладают высокой чувствительностью и точностью в сравнении с ранее выпускавшимися приборами. В термовольтметре Т-17 (рис. 5-36) обычный вакуумный бесконтактный термопреобразователь ТВБ на 1 ма сочетается с фотокомпенсационным усилителем, имеющим предел измерения 40 мкв. Такое сочетание позволило уменьшить ток, протекающий по нагревателю, в несколько раз. Созданный на этой основе прибор сохраняет все достоинства обычных термоприборов и, кроме того, имеет большое входное сопротивление до 10 ком на 1 в и устойчивость к перегрузкам.

Ток I , проходящий через нагреватель термопреобразователя ТВБ (рис. 5-36), зависит от величины измеряемого напряжения U_x . Переключатель П и сопротивления r_2 , r_3 , r_4 и r_5 служат для изменения предела измерения. Ток в цепи гальванометра Г зависит от величины

термо-э. д. с., возникающей на свободных концах *a* и *б* термопары, и, следовательно от U_x . При $U_x=0$ ток в цепи гальванометра отсутствует, величины фотосопротивлений ΦC одинаковы и токи I_1 и I_2 взаимно компенсируют друг друга. Показание выходного миллиамперметра mA при этом равно нулю.

При включении входных зажимов прибора $11'$ в цепь с измеряемым напряжением U_x в цепи обмотки гальванометра Γ пойдет ток. Перемещение светового луча, отраженного от зеркальца гальванометра, по поверхностям фотосопротивлений вызовет изменение их величины (увеличение сопротивления одного элемента фотосопротивления и одновременное уменьшение сопротивления другого). Вследствие этого ток I_1 не будет равен току I_2 и через измеритель (mA) пойдет разностный ток. Таким образом, угол отклонения миллиамперметра будет являться функцией измеряемого напряжения U_x . Сопротивление T_h является элементом так называемой обратной связи, которая вводится в схему для получения стабильного коэффициента усиления (см. § 5-2, ж). В рассмотренном приборе выходной ток миллиамперметра с очень большой точностью воспроизводит входную величину. Через конденсаторы C_1 и C_2 могут беспрепятственно проходить переменные составляющие выпрямленных токов I_1 и I_2 .

В термовольтметре Т-17 с помощью фотокомпенсационного усилителя наиболее эффективно решена задача получения наивысшей чувствительности к напряжению для приборов термоэлектрической системы при минимальной мощности потерь.

Прибор весьма устойчив к перегрузкам — выдерживает длительную перегрузку двукратным током и кратковременную — десятикратным. Основная погрешность не превышает $\pm 1\%$.

Завод изготавливает термоэлектрические вольтметры Т-131 и Т-132, которые представляют собой модернизированные термовольтметры Т-17 и многопредельный милливольтметр Т-130 с большим входным сопротивлением. Кроме того, изготавливается многопредельный микроамперметр Т-133 с пределами 100—250—500— и 1 000 μA .

Положительные свойства термоэлектрических приборов:

- 1) высокая чувствительность;
- 2) независимость показаний от частоты в широких пределах.

Отрицательные свойства:

- 1) относительно невысокая точность;
- 2) зависимость показаний от внешней температуры.

5-5. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

В электромагнитных амперметрах и вольтметрах применяется измерительный механизм той же системы (см. § 4-2).

В амперметрах весь измеряемый ток проходит по обмотке неподвижной катушки измерительного механизма и шкала имеет деления, соответствующие значениям этого тока. Катушка амперметра выполняется из провода, сечение которого определяется номинальным током амперметра, исходя из условий допустимого нагревания. Номинальная намагничивающая сила при любом номинальном токе составляет от 200 до 300 *ав*. Таким образом, амперметр на номинальный ток 5 *а* имеет от 40 до 50 витков, амперметр на номинальный ток 250 *а* имеет один виток из медной шины. Электромагнитные амперметры изготавливаются на номинальные токи до 300 *а*. При больших значениях номинального тока могут иметь место нагрев шины и магнитные влияния тока подводющих проводов — шин.

Так как катушка электромагнитного амперметра обладает активным и реактивным сопротивлением и падение напряжения на ней сравнительно велико (порядка 400 *мв*), то шунты для расширения предела измерения по току применять нецелесообразно, тем более, что при этом необходимо включать большое добавочное сопротивление из манганина для уменьшения температурной погрешности (см. § 5-1, в).

Катушки переносных многопредельных амперметров делают состоящими из двух или четырех частей — секций, которые при помощи переключателя соединяются различным образом (рис. 5-37), обеспечивая получение пределов измерения — номинальных токов с отношением 1:2 или 1:2:4.

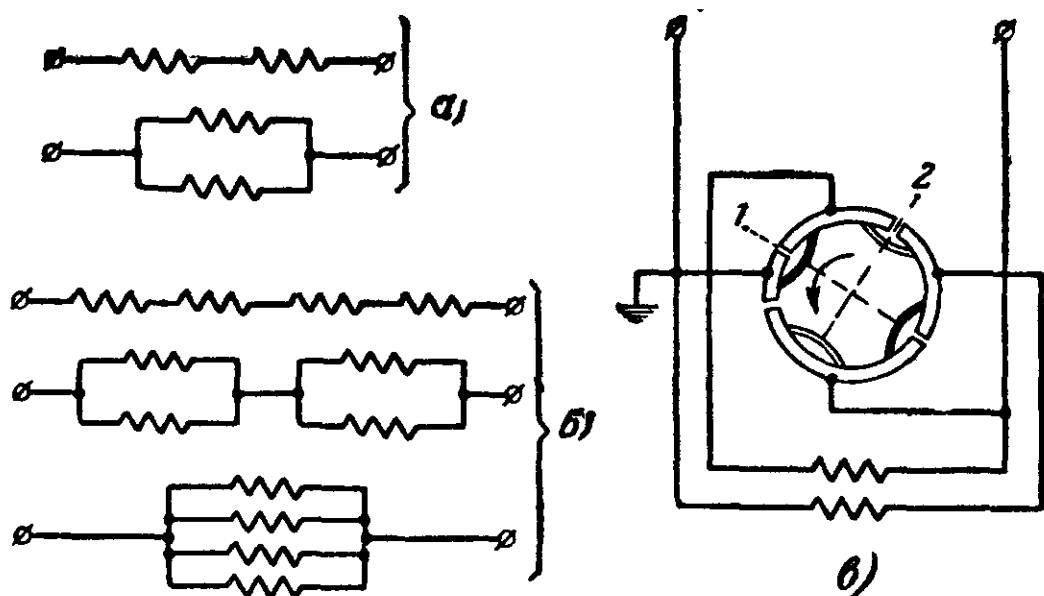


Рис. 5-37. Схемы соединения секций катушек многопредельных амперметров.

а — двухпредельного; *б* — трехпредельного; *в* — переключатель на два предела.

В электромагнитных вольтметрах катушка соединена последовательно с безреактивным добавочным сопротивлением. Вольтметры изготавливаются на номинальный ток 25—50 *ма*. У вольтметров на пониженные пределы измерения (на 1,5; 7,5 и 15 *в*) номинальный ток достигает 200 *ма*.

При включении вольтметра в цепь постоянного тока его ток

$$I_V = \frac{U}{r_V} = \frac{U}{r_K + r_d}, \quad (5-22)$$

где r_K — сопротивление катушки вольтметра.

При постоянном сопротивлении вольтметра, что обеспечивается применением добавочного сопротивления из манганина, угол поворота подвижной части вольтметра будет пропорционален квадрату напряжения на зажимах вольтметра, так как

$$\alpha = kI_V^2 = k \frac{1}{(r_K + r_d)^2} U^2 = k_1 U^2. \quad (5-23)$$

При включении вольтметра в цепь переменного тока его ток

$$I_V = \frac{U}{z_V} = \frac{U}{\sqrt{(r_K + r_d)^2 + (2\pi fL)^2}}. \quad (5-24)$$

Вольтметр будет давать одинаковые показания при работе в цепи постоянного и переменного тока, если $r_v = z_v$, т. е. если r_d настолько велико по сравнению с $2\pi fL$, что в выражении тока можно пренебречь реактивным сопротивлением вольтметра. В этом случае формула (5-23) будет применима и для цепи переменного тока. Таким образом, добавочное сопротивление служит для расширения пределов измерения, компенсации влияния температуры и компенсации влияния рода тока и частоты на показания вольтметра.

На низких пределах измерения изменение пределов за счет уменьшения добавочного сопротивления нерационально, так как добавочное сопротивление и сопротивление катушки становятся соизмеримыми и температурная погрешность будет возрастать. Вольтметры для непосредственного включения изготавливают на напряжение до 600 в.

Для повышения точности электромагнитных приборов сердечник подвижной части изготавливают из пермаллоя. При этом понижается погрешность от гистерезиса и вихревых токов.

Влияние частоты на показания амперметров сравнительно невелико, и они могут применяться в расширенной области частот до 1 500 гц.

В вольтметрах влияние частоты сказывается сильнее, так как индуктивность катушки у них больше и расширенная область частот для вольтметров составляет от 90 до 200 гц.

Наша промышленность наряду с техническими амперметрами и вольтметрами классов 1,5 и 2,5 выпускает также переносные, двух-, трех- и четырехпредельные электромагнитные амперметры и вольтметры класса 0,5 для постоянного и переменного тока.

В приборах типа Э-59 (рис. 5-38) подвижная часть выполнена на растяжках и измерительный механизм хорошо экранирован.

Положительные свойства электромагнитных приборов:

- 1) пригодность для постоянного и переменного тока;
- 2) устойчивость к перегрузкам;
- 3) простота конструкции.

Отрицательные свойства:

- 1) неравномерность шкалы;

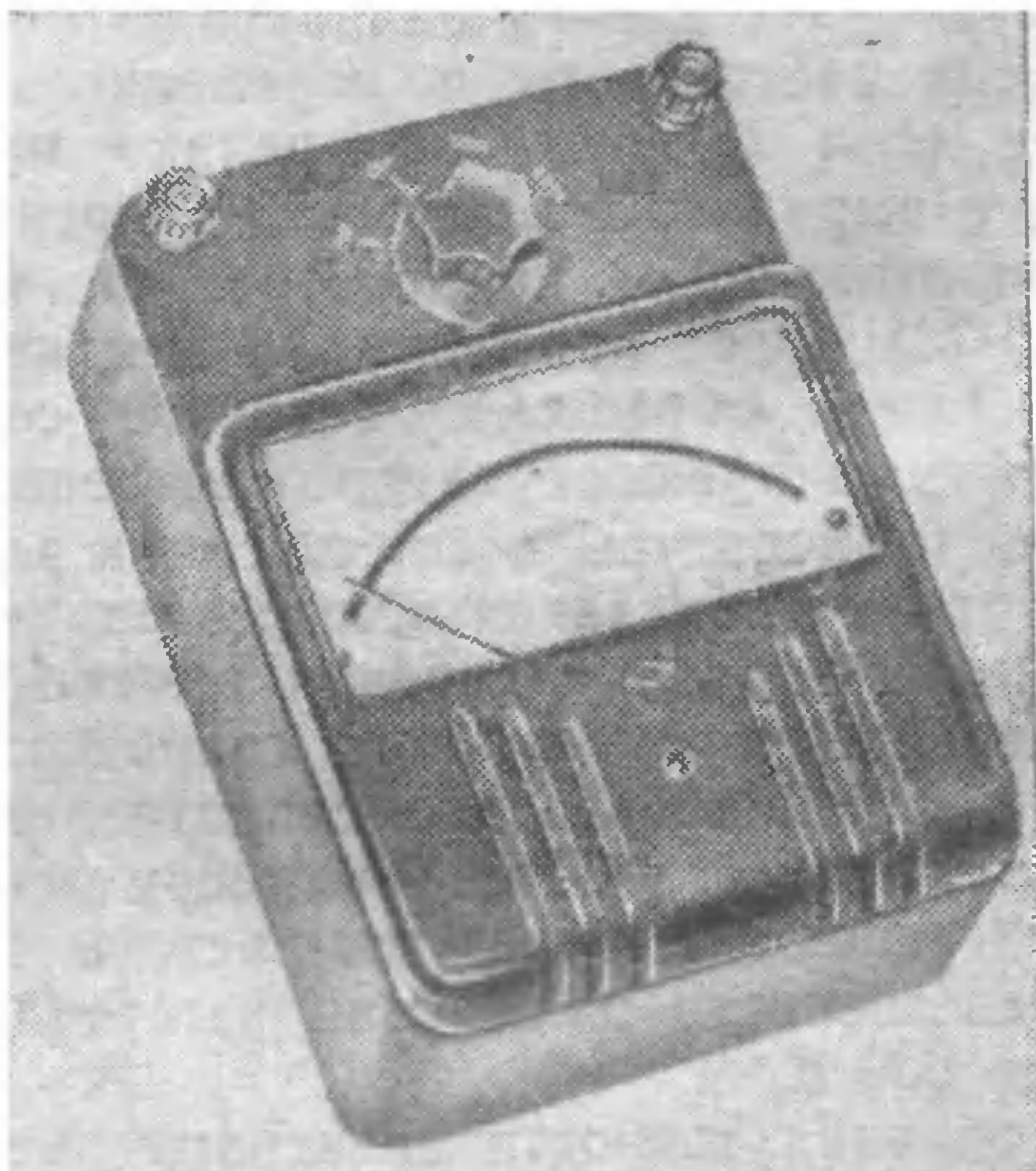


Рис. 5-38. Вольтметр электромагнитной системы, тип Э-59.

- 2) значительная мощность потерь;
- 3) зависимость показаний от внешних магнитных полей.

5-6. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМ

Амперметр электродинамической системы представляет собой измерительный механизм той же системы (см. § 4-3), на шкале которого нанесены деления, соответствующие значениям проходящего по нему тока.

Подвижная катушка измерительного механизма для уменьшения погрешности от трения должна быть легкой и, следовательно, выполняться из провода малого сечения. Номинальный ток ее обычно не превышает 500 *ма*. Неподвижная катушка может быть выполнена из проводов как малого, так и большого сечения, на номинальный ток от десятков миллиампер до 5 *а* и выше. В миллиамперметрах катушки соединяются последовательно (рис. 5-39, *а*), а в амперметрах — параллельно

(рис. 5-39,б) ввиду невозможности иметь подвижную катушку на ток выше 0,5 а.

Кроме того, неподвижная катушка может изготавливаться секционированной, и в схемах многопредельного прибора применяют переключение секций с последовательного включения на параллельное (рис. 5-37).

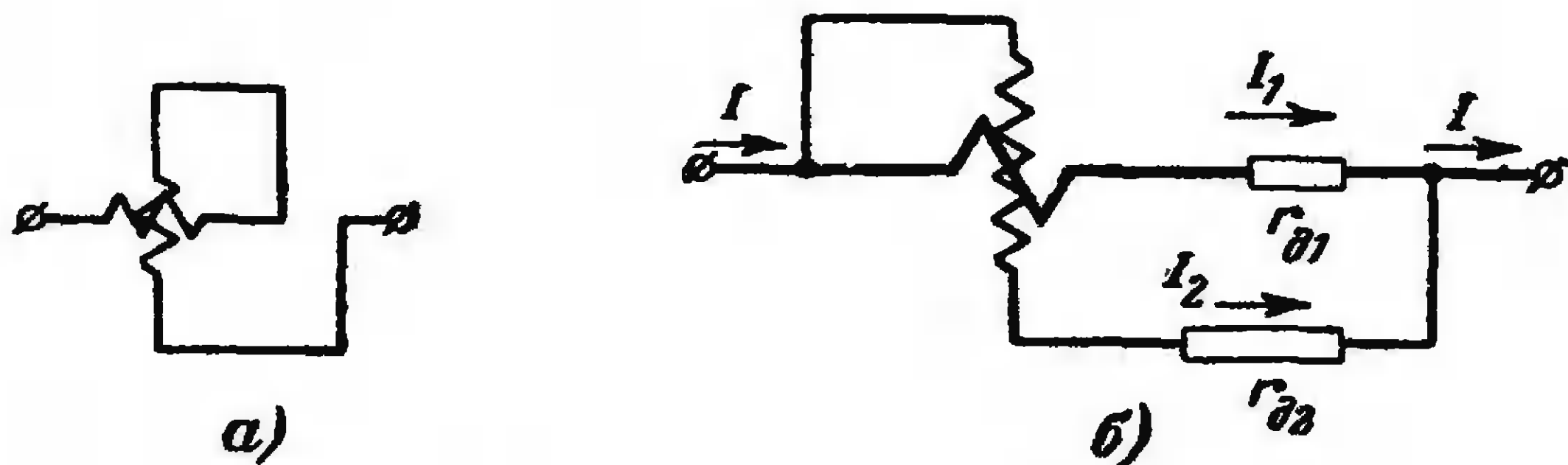


Рис. 5-39. Схемы соединения катушек электродинамического миллиамперметра (а) и амперметра (б).

При последовательном соединении катушек (рис. 5-39,а) при работе в цепи постоянного тока токи катушек $I_1 = I_2 = I$ и угол поворота подвижной части

$$\alpha = k_s I_1 I_2 = k_s I^2. \quad (5-25)$$

При работе в цепи переменного тока при том же соединении катушек мгновенные значения токов в катушках одинаковы, следовательно, одинаковы их действующие значения, и они совпадают по фазе, т. е. $I_1 = I_2 = I$ и $\angle \psi = 0$. Угол поворота в подвижной части [см. (4-11) и (4-15)].

$$\alpha = k_s I_1 I_2 \cos \psi = k_s I^2. \quad (5-26)$$

В амперметрах катушки и последовательно соединенные с ними добавочные сопротивления из манганина образуют две параллельные ветви (рис. 5-39,б) с практически неизменными сопротивлениями.

При работе в цепи постоянного тока ток каждой из параллельных ветвей пропорционален измеряемому току, так как

$$I_1 = \frac{r}{r_1} I = k' I \text{ и } I_2 = \frac{r}{r_2} I = k'' I,$$

где r_1 , r_2 и r — сопротивления параллельных ветвей и эквивалентное сопротивление прибора $\left(r = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2} \right)$.

Угол поворота подвижной части амперметра

$$\alpha = k_3 I_1 I_2 = k_3 k' / k'' I = k_4 I^2. \quad (5-27)$$

Для того чтобы показания амперметра в цепи переменного тока были такими же, как и в цепи постоянного тока, необходимо добавочные сопротивления отрегулировать так, чтобы $\frac{x_1}{r_1} = \frac{x_2}{r_2}$. В этом случае токи в катушках совпадают по фазам ($\psi_1 = \psi_2$ и $\psi = 0$) и распределение токов в ветвях будет одинаковым при том и другом роде тока.

В этом случае

$$\alpha = k_3 I_1 I_2 \cos \psi = k_3 k' / k'' I = k_4 I^2.$$

Зависимость показаний электродинамических амперметров от частоты невелика, и поэтому такие приборы могут применяться в цепях переменного тока частотой до 1500 гц.

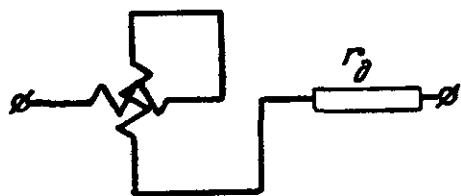


Рис. 5-40. Схема соединения катушек электродинамического вольтметра.

Электродинамический вольтметр представляет собой измерительный механизм той же системы, катушки которого соединены последовательно между собой и с добавочным сопротивлением (рис. 5-40). На шкале вольтметра

нанесены деления, дающие значение напряжения на его зажимах.

Добавочное сопротивление имеет то же назначение, что и в вольтметрах электромагнитной системы.

При работе в цепи постоянного тока угол поворота подвижной части вольтметра

$$\alpha = k_3 I_V^2 = k_3 \left(\frac{U_V}{r_V} \right)^2,$$

а при неизменном значении сопротивления вольтметра

$$\alpha = k_5 U^2, \quad (5-28)$$

где $k_5 = \frac{k_3}{r_V^2}$.

При работе в цепи переменного тока угол поворота подвижной части вольтметра

$$\alpha = k_3 I_V^2.$$

Так как добавочное сопротивление велико по сравнению с реактивным сопротивлением вольтметра, то $z_V = r_V$ и зависимость между углом поворота подвижной части и напряжением на зажимах вольтметра остается той же, что и для цепи постоянного тока (5-28).

При изменении частоты в вольтметрах вследствие изменения их полного сопротивления

$$z_V = \sqrt{(r_k + r_d)^2 + (2\pi f L)^2}$$

возникает частотная погрешность. Для компенсации ее в вольтметрах высоких классов точности параллельно части добавочного сопротивления подключают емкость, что позволяет расширить частотный диапазон.

Приборостроительные заводы СССР выпускают большое количество типов электродинамических амперметров и вольтметров классов точности 0,1; 0,2; и 0,5. Миллиамперметры высокой чувствительности типа Д-528 со световым отсчетом изготавливаются двухпредельными, на номинальный ток от 1 до 100 *ма*; вольтметры Д-523 выпускаются трех- и четырехпредельными, на номинальное напряжение от 1,5 до 600 *в*, при номинальном токе от 37,5 до 3 *ма*. Хорошими качествами обладают электродинамические приборы (амперметры, вольтметры и ваттметры) типа Д-533 класса 0,2, предназначенные для применения в цепях постоянного и переменного тока с номинальной частотой 50 *гц* и в расширенном диапазоне частот от 90 до 1 000 *гц*.

Электродинамические амперметры и вольтметры класса 0,1 типа Д-57 имеют световой отсчет с двумя оптическими системами. Шкала прибора состоит из двух строк длиной по 300 *мм* каждая с нониусной сеткой, позволяющей производить отсчет с точностью до 0,1 деления. Двухстрочечная шкала с двумя осветителями удваивает длину шкалы, что значительно повышает точность отсчета. Выпускаются также амперметры серии Д-570 класса 0,5, имеющие встроенный трансформатор тока и световой отсчет.

Положительные свойства электродинамических приборов:

- 1) высокая точность;
- 2) пригодность для постоянного и переменного тока.

Отрицательные свойства:

- 1) чувствительность к перегрузкам;
- 2) зависимость показаний от внешних магнитных полей;
- 3) высокая стоимость.

У ферродинамических амперметров и вольтметров, так же как и у электродинамических, вращающий момент пропорционален квадрату измеряемой величины. В некоторых приборах эту зависимость изменяют, приближая к линейной, за счет получения воздушного зазора, имеющего наименьшую длину в месте начального положения рамки и увеличивающегося до наибольшей длины в месте расположения рамки при номинальной нагрузке.

Ферродинамические приборы нашли себе применение как самопишущие приборы для цепей переменного тока номинальной технической частоты (50 гц) и повышенной частоты (1 000 гц). Они выпускаются отечественной промышленностью с классом точности 1,5 и 2,5.

Положительные свойства ферродинамических приборов:

- 1) большой вращающий момент;
- 2) прочность конструкции и надежность в работе;
- 3) независимость показаний от внешних магнитных полей.

Отрицательные свойства:

- 1) невысокая точность;
- 2) большая частотная погрешность.

5-7. ВОЛЬТМЕТРЫ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Электростатический вольтметр представляет собой измерительный механизм той же системы (см. § 4-6), на шкале которого нанесены деления, соответствующие значениям напряжения на его зажимах.

Для расширения предела измерения напряжения в цепях переменного тока применяются добавочные конденсаторы (рис. 5-41,а), или конденсаторные делители напряжения (рис. 5-41,б).

Добавочный конденсатор включается последовательно с вольтметром. При таком соединении между измеряемым напряжением U и напряжением на вольтметре U_v имеет место соотношение

$$U \frac{C_v C}{C_v + C} = U_v C_v,$$

откуда

$$U = U_v \frac{C_v + C}{C} = U_v p, \quad (5-29)$$

где C — емкость добавочного конденсатора;

p — множитель, показывающий, во сколько раз измеряемое напряжение больше напряжения на измерительном механизме.

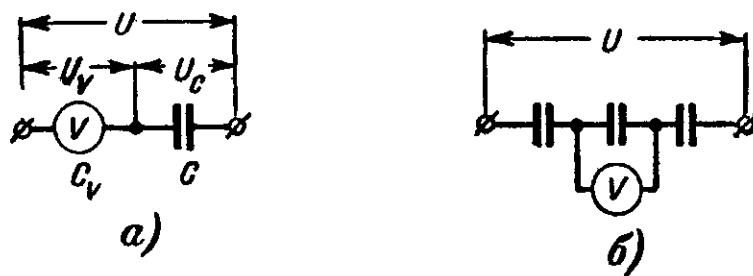


Рис. 5-41. Расширение предела измерения электростатического вольтметра

a — добавочным конденсатором; *б* — конденсаторным делителем напряжения.

Емкость $C < C_v$. Включение добавочного конденсатора вызывает дополнительную погрешность, так как емкость прибора C_v зависит от угла отклонения подвижной части.

Конденсаторный делитель напряжения представляет собой несколько последовательно соединенных конденсаторов. При неизменной емкости конденсаторов между измеряемым напряжением U и напряжением на том из конденсаторов, параллельно которому присоединен вольтметр (U_v), будет постоянное соотношение, следовательно,

$$U = U_v p.$$

Промышленность выпускает переносные электростатические вольтметры серии С-50, С-95; С-100 и другие.

Вольтметры С-50 являются однопредельными экранированными приборами электростатической системы со световым отсчетом и воздушным успокоением.

Входная емкость таких вольтметров очень мала (от 4 до 10 пф). Они предназначены для измерения напряжения в цепях постоянного и переменного тока в диапазоне частот от 20 гц до 10 Мгц. Основная погрешность в номинальном диапазоне частот от 20 гц до 5 Мгц — $\pm 1\%$, в расширенном — $\pm 2\%$. Пределы измерения — 30—3 000 в.

Приборы серии С-100 применяются в цепях высокого напряжения и имеют пределы измерения 25—50—75 кв; класс точности—1,5, диапазон частот от 50 гц до 0,5 мгц.

Положительные свойства электростатических вольтметров:

- 1) ничтожная мощность потерь;
- 2) пригодность для постоянного и переменного тока;
- 3) независимость показаний от частоты и формы кривой;
- 4) независимость показаний от внешних магнитных полей.

Отрицательные свойства:

- 1) низкая чувствительность;
- 2) зависимость показаний от внешних электрических полей.

5-8. ЭЛЕКТРОННЫЕ (ЛАМПОВЫЕ) ВОЛЬТМЕТРЫ

В настоящее время электронные измерительные приборы представляют особую группу. Главным образом выпускаются электронные вольтметры, миллиамперметры, омметры и электронные приборы для измерения индуктивности, емкости, электронные потенциометры и устройства для радиотехнических измерений. Подробное изучение электронных измерительных приборов рассматривается в специальных курсах. Ниже кратко рассмотрены устройство и принцип действия электронных вольтметров.

По ГОСТ 9781-61 электронные вольтметры делятся по точности на классы: 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0; 6,0 и 10.

В общем случае приборы электронной системы представляют собой сочетание электронной части (предназначенной для преобразования, выпрямления и усиления электрических величин) и измерительного механизма магнитоэлектрической системы.

В последнее время разработаны и получили значительное применение электронные миллиамперметры и вольтметры, в которых на выходе лампового усилителя включается измерительный механизм (вольтметр) электростатической системы. Показания электростатического вольтметра в широком диапазоне частот не зависят от частоты и формы кривой измеряемых величин. Разработаны и применяются электронные приборы на полупроводниках.

Электронные вольтметры применяются в цепях постоянного и переменного тока.

Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока дана на рис. 5-42. Усилитель постоянного тока дает на выходе ток I , пропорциональный входному измеряемому напряжению U_x . Ток I учитывается выходным прибором — микроамперметром магнитоэлектрической системы. Угол отклонения подвижной части выходного прибора пропорционален U_x .

$$\alpha = kU_x, \quad (5-30)$$

где k — коэффициент пропорциональности, зависящий от чувствительности микроамперметра к току и от коэффициента усиления усилителя.

На рис. 5-43 показана схема простейшего лампового

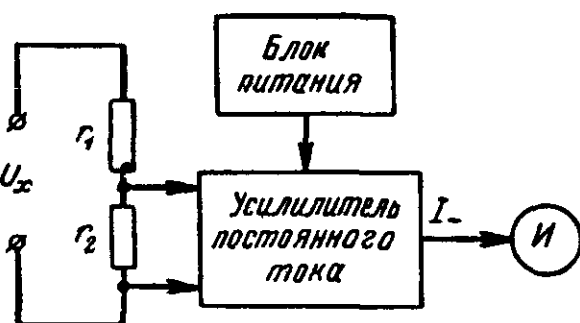


Рис. 5-42. Структурная схема электронного вольтметра постоянного тока.

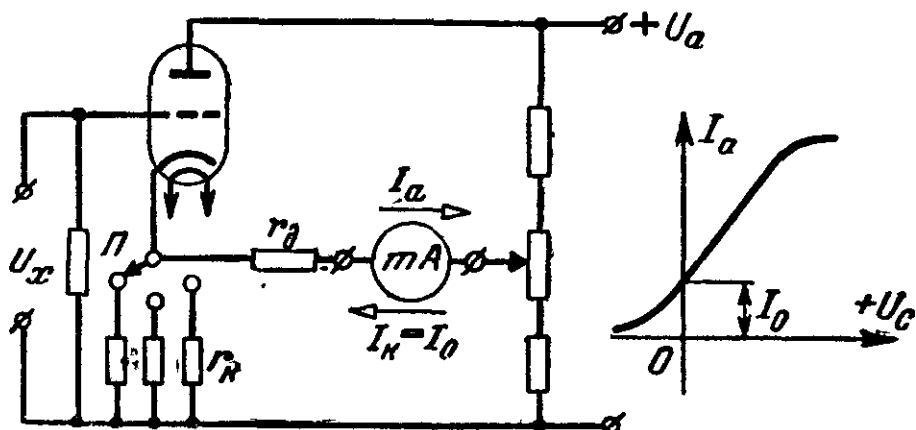


Рис. 5-43. Схема простейшего электронного вольтметра постоянного тока.

вольтметра постоянного тока. Триод выполняет роль усилителя. Измеряемое напряжение U_x подается на сетку триода. Чем больше напряжение на сетке лампы, тем больше ток в цепи измерительного механизма. Для изменения пределов измерения переключателем Π включают различные катодные сопротивления r_k . Чем больше r_k , тем выше предел измерения.

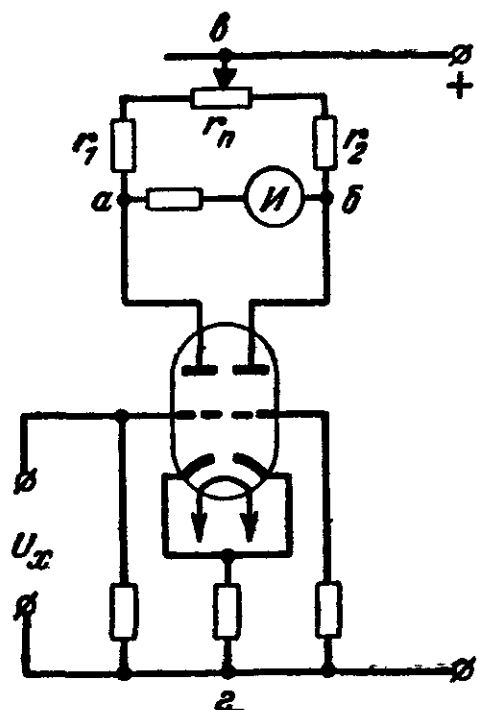


Рис. 5-44. Мостовая (балансная) схема электроинного вольтметра постоянного тока.

Начальный ток триода I_0 ($U_x=0$), проходящий через измерительный механизм, приводит к неполному использованию шкалы прибора.

В схеме применена компенсация начального тока. Источником тока компенсации I_k является часть напряжения анодного питания триода. Регулировкой тока I_k стрелка измерителя устанавливается на нуль.

На рис. 5-44 дана принципиальная мостовая схема лампового вольтметра постоянного тока. Два плеча моста образуются анодными сопротивлениями r_1 и r_2 , а два других плеча образованы лампой — двойным триодом. В диаго-

наль ab включен выходной прибор $И$. На диагональ $вг$ подается напряжение питания U_a ; установка на нуль измерительного прибора производится выравниванием потенциалов обоих анодов потенциометром r_n . При $U_x=0$ потенциалы сеток одинаковы, мост уравновешен, и ток через измеритель не идет. При наличии U_x анодный ток левой половины лампы увеличивается, потенциал точки a падает, и через измеритель идет ток. Эта схема вольтметра обладает большей точностью, и установка нуля более устойчива.

Ламповые вольтметры переменного тока представляют собой сочетание детектора, лампового усилителя и измерительного механизма.

Структурные схемы электронных вольтметров переменного тока даны на рис. 5-45.

В схеме на рис. 5-45,а измеряемое напряжение U_x выпрямляется детектором D и подается на вход усилителя постоянного тока. На выходе усилителя включен измерительный прибор магнитоэлектрической системы.

В схеме 5-45,б измеряемое переменное напряжение U_x усиливается усилителем переменного тока, а затем выпрямляется (детектируется). На выходе детектора D включается измерительный механизм магнитоэлектрической системы.

Вольтметр по схеме а в сравнении со схемой б имеет меньшую чувствительность и меньшую точность, так как

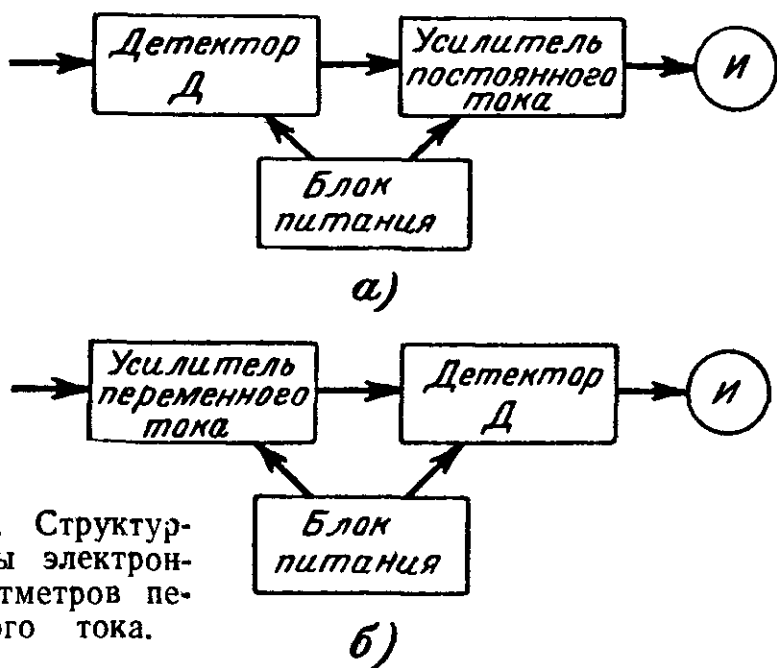


Рис. 5-45. Структурные схемы электронных вольтметров переменного тока.

при низких напряжениях детектор плохо работает. Но схема а имеет более широкий диапазон частот для измеряемого напряжения. Вольтметры, выполненные по схеме б, имеют высокую чувствительность, но более узкий рабочий диапазон частот, так как при широкой полосе пропускания частот схема усилителя значительно усложняется.

На рис. 5-46 даны принципиальные схемы ламповых вольтметров переменного тока на двойном диоде. Схема на рис. 5-46,а соответствует электронному вольтметру с детектором среднего значения. Такой прибор имеет линейную характеристику. Через измерительный механизм ток проходит только при положительной полуволне напряжения U_x на аноде. Вращающий момент и угол отклонения подвижной части измерительного механизма

пропорциональны среднему значению измеряемого напряжения. Так как шкала вольтметра градуируется при синусоидальной форме U_x в действующих значениях, то показания электронного вольтметра с детектором среднего значения зависят от формы кривой измеряемого напряжения.

Начальный ток диода I_0 (при $U_x=0$) компенсируется здесь за счет начального тока дополнительного диода I_K ,

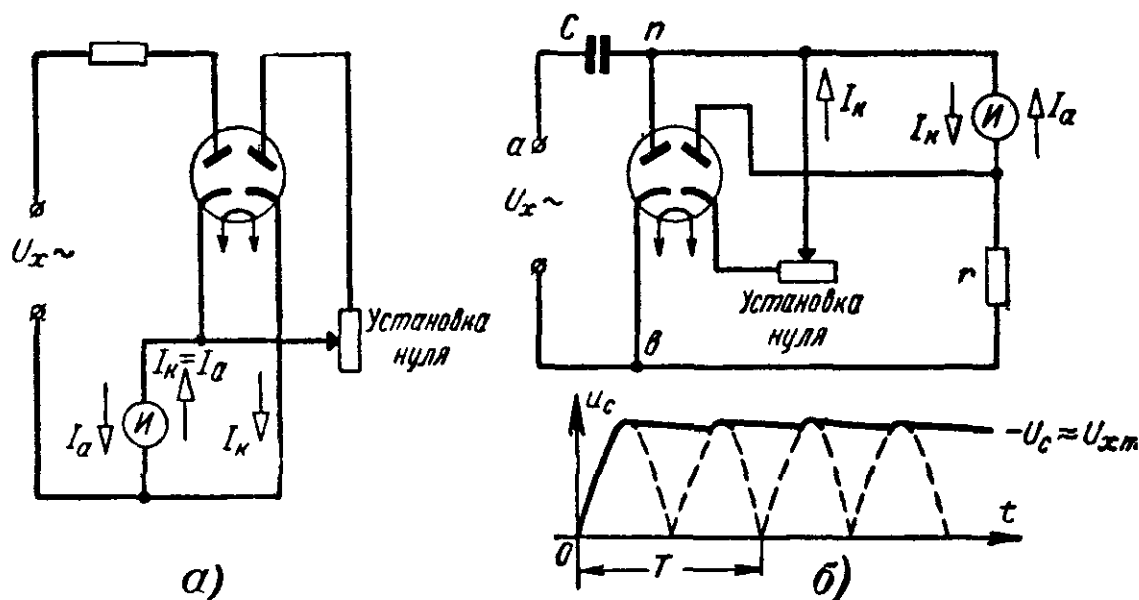


Рис. 5-46. Схемы диодных вольтметров переменного тока.
а — с детектором среднего значения; б — с амплитудным детектором.

проходящего через измерительный механизм в обратном направлении.

В схеме рис. 5-46,б показания измерительного прибора пропорциональны амплитудному (максимальному) значению измеряемого напряжения U_x .

Вольтметр работает следующим образом. Если потенциал точки a выше потенциала точки b , то диод проводит ток. Конденсатор C быстро заряжается (так как сопротивление открытого диода мало) до максимального значения входного напряжения. Это происходит в одну часть периода. Во вторую часть периода входное напряжение u_x становится меньше напряжения на конденсаторе u_c , последний разряжается. При этом потенциал анода (точка n) отрицателен по отношению к катоду (точка b) и, следовательно, диод заперт, а конденсатор разряжается через измеритель и сопротивление r , которое выбирается во много раз больше сопротивления про-

водящего диода. Скорость протекания разряда конденсатора будет во много раз меньше скорости зарядного процесса. Напряжение на конденсаторе практически будет сохраняться равным максимальному значению измеряемого напряжения.

Таким образом, при выполнении условия $Cr \gg T$ (где T — период измеряемого напряжения), показания измерительного механизма пропорциональны амплитудным значениям U_m измеряемого переменного напряжения U_x . Шкала вольтметра может быть проградуирована в действующих значениях синусоидального напряжения, тогда при любой форме кривой измеряемого напряжения

$$U_m = \frac{U}{0,707}, \quad (5-31)$$

где U — отсчет по шкале.

В рассмотренной схеме начальный ток диода I_0 при $U_x=0$, так же как и в предыдущей, компенсируется начальным током I_K дополнительного диода.

На рис. 5-47 дана принципиальная схема электронного вольтметра, в котором триод выполняет функции выпрямителя и усилителя. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы включен в анодную цепь триода. Измеряемое напряжение U_x подводится к сетке триода, начальный потенциал которой (при $U_x=0$) можно изменять с помощью делителя напряжения r_c .

Можно подобрать нелинейную характеристику лампы $i_a = f(u_c)$ и начальное сеточное смещение U_c таким образом, что изменение среднего значения анодного тока лампы будет зависеть от действующего значения измеряемого напряжения U_x практически при любой форме кривой.

Зависимость между анодным током i_a и результирующим напряжением на сетке лампы U_c дана на рис. 5-48.

При $U_x=0$ сетка лампы будет иметь относительно катода некоторый отрицательный потенциал U_{c0} . При этом в анодной цепи будет проходить постоянный анодный ток i_{a0} , при котором стрелка прибора установится

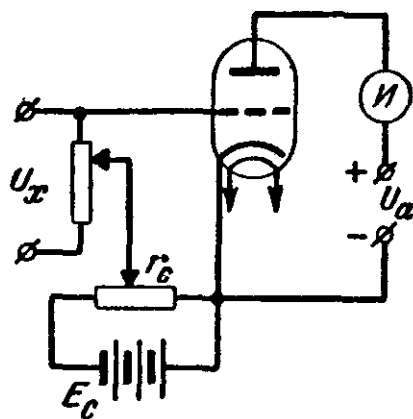


Рис. 5-47. Схема электронного вольтметра с квадратичной характеристикой.

на «условный нуль» вольтметра. При включении измеряемого напряжения U_x (кривые 1, 2, 3, 4, 5 на рис. 5-48) напряжение на сетке будет равно сумме U_{co} и u_x (кривая 1', 2', 3', 4', 5').

Находя по кривой $i_a = f(u_c)$ анодный ток, соответствующий различным значениям результирующего сеточ-

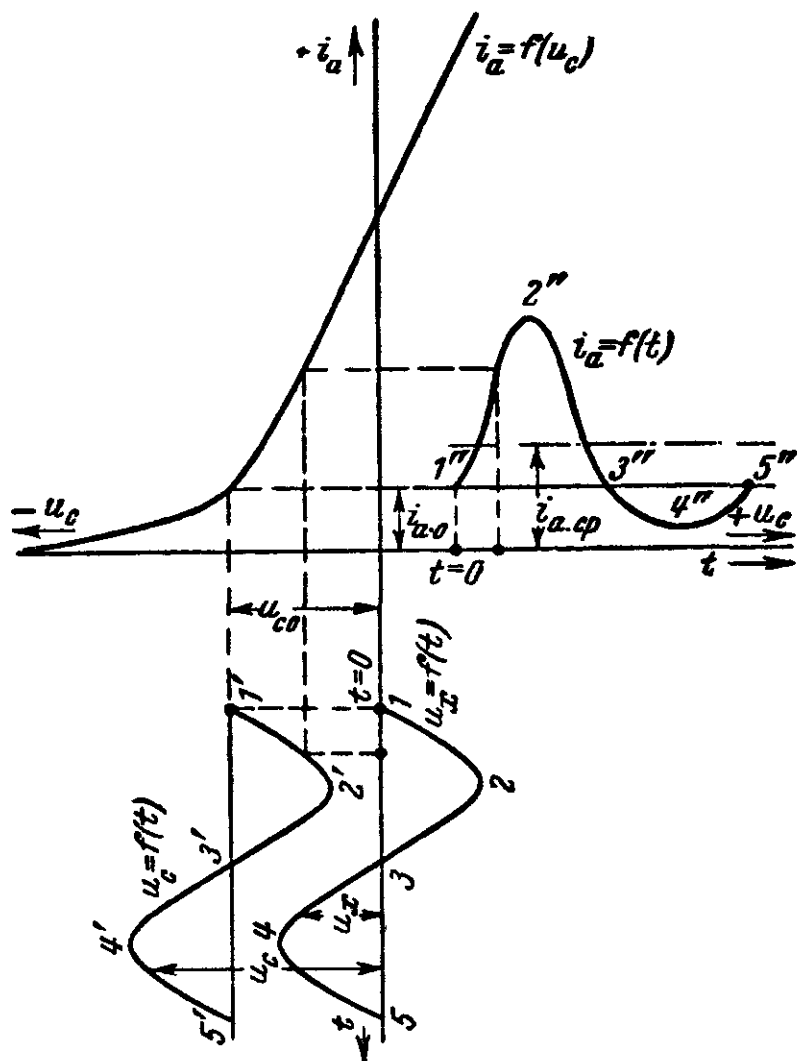


Рис. 5-48. Характеристика электронной лампы и кривая тока измерительного механизма.

ного напряжения $u_c = f(t)$, легко построить кривую анодного тока $i_a = f(t)$ в зависимости от времени (кривая 1'', 2'', 3'', 4'', 5''). Таким образом, в анодной цепи будет пульсирующий ток, зависящий от измеряемого напряжения. Вследствие нелинейности характеристики форма кривой анодного тока i_a при положительной полуволне напряжения u_x получается несколько растянутой вверх, а при отрицательной — несколько притупленной.

Изменение постоянной составляющей анодного тока

$$\Delta I_a = i_{a \text{ ср}} - i_{a0}$$

при любой форме кривой входного измеряемого напряжения и соответствующем выборе U_{co} и характеристики $i_a = f(u_c)$ будет примерно пропорционально квадрату действующего значения напряжения U_x , т. е.

$$\Delta I_a^2 = k U_x^2.$$

Шкала прибора получается квадратичной. Так как при $U_x = 0$ анодный ток лампы не равен нулю, то в реальных вольтметрах через выходной прибор (миллиамперметр) пропускают ток компенсации $i_k = i_{a0}$, направленный противоположно.

Электронные вольтметры обладают очень большой чувствительностью к напряжению и применяются для измерения малых значений напряжения.

Большое входное сопротивление электронных вольтметров и широкий диапазон частот делают их незаменимыми при многих радиотехнических измерениях, а также при применении в цепях с маломощными источниками питания.

Промышленность выпускает большое количество различных электронных приборов. Электронные вольтметры имеют сложные схемы электронных цепей и специальные устройства, повышающие точность приборов и стабильность их работы. Пределы измерения современных электронных вольтметров составляют от сотых долей вольта до 300 и более вольт.

Представляется интересным отметить, что в настоящее время отечественные заводы изготавливают многопредельные электронные вольтметры типа Ф-505 (рис. 5-49) класса 1,5 при номинальной области частот от 45 гц до 5 000 гц и многопредельные высокочувствительные миллиамперметры типа Ф-58.

Эти приборы предназначены для измерения действующих значений напряжений и токов в цепях переменного тока при искаженной форме кривой. Схема приборов представляет собой двухкаскадный усилитель напряжения низкой частоты с глубокой отрицательной обрат-

ной связью, которая обеспечивает высокую стабильность в работе и постоянство коэффициента усиления. На выходе усилителя включен электростатический вольтметр.

Положительные свойства электронных вольтметров:

1) высокая чувствительность;

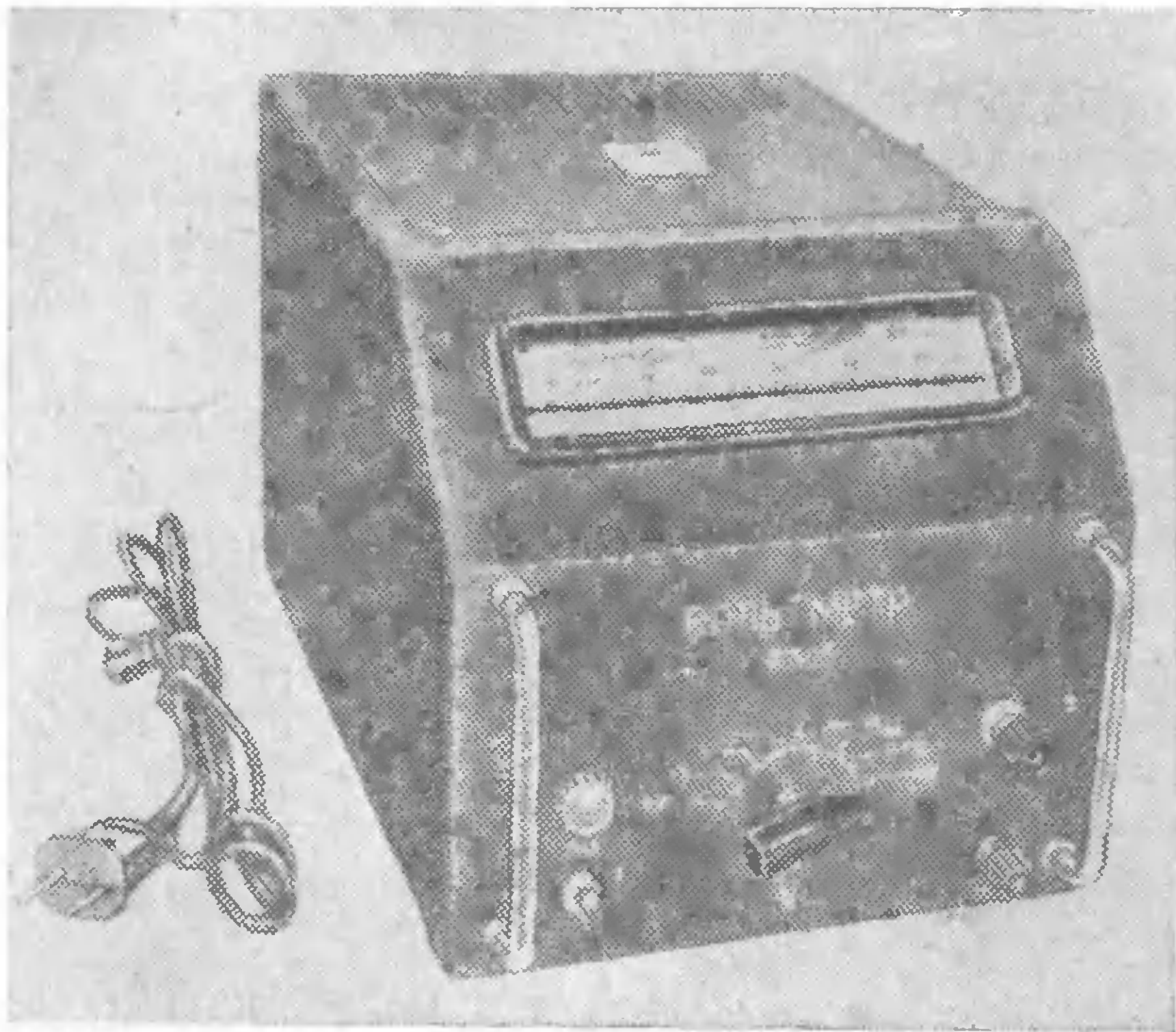


Рис. 5-49. Электронный вольтметр.

2) ничтожная мощность потерь вольтметра со стороны объекта измерения;

3) независимость показаний от частоты и формы кривой.

Отрицательные свойства:

1) невысокая точность (1—2,5%);

2) необходимость иметь вспомогательный источник питания;

3) необходимость новой градуировки при замене ламп.

ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

6-1. КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ (э. д. с.)

Рассмотренные в предыдущих главах приборы непосредственной оценки для измерения тока и напряжения, как мы видели выше, могут дать в лучшем случае точность порядка $\pm 0,1\%$.

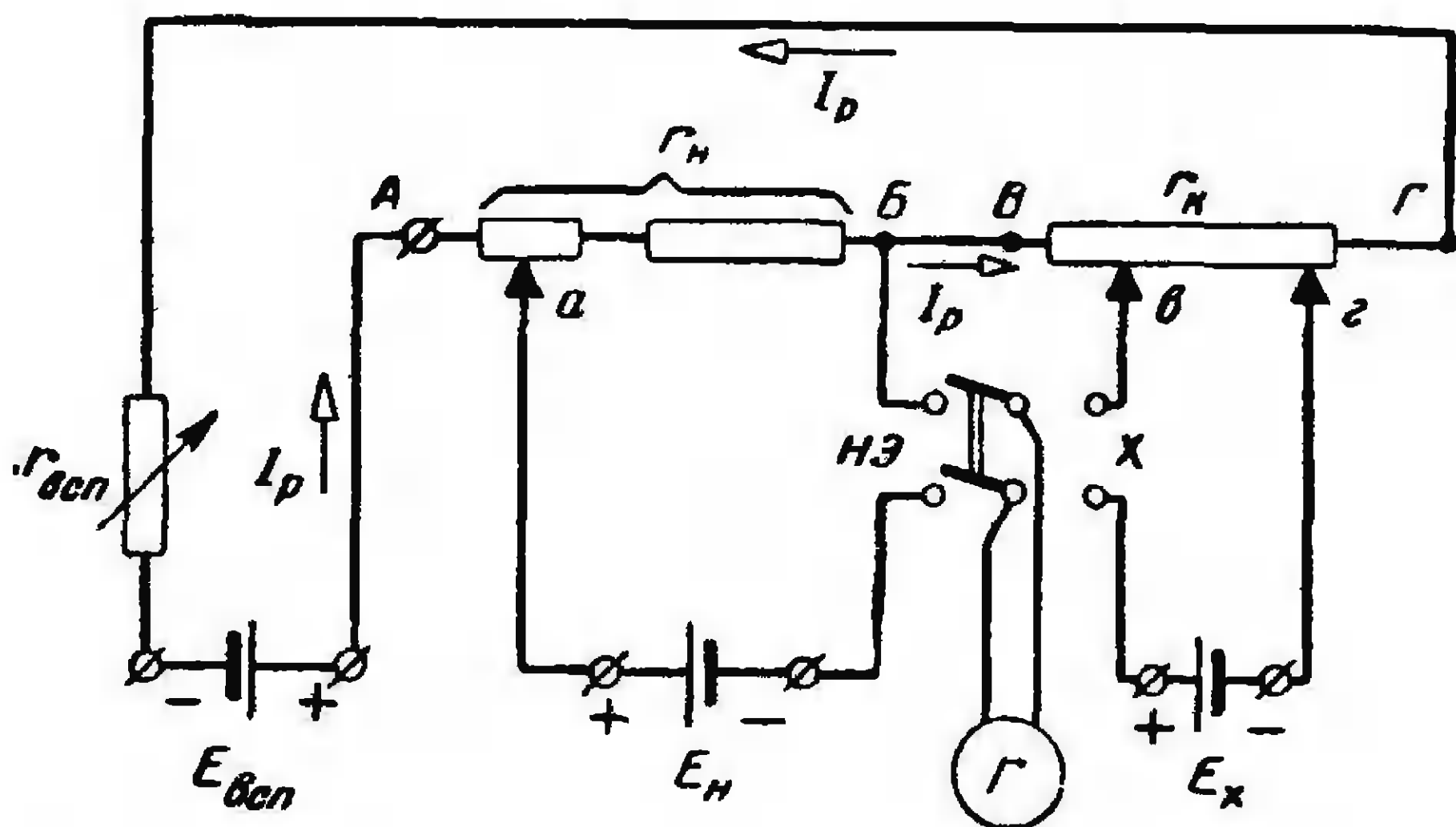


Рис. 6-1. Схема для измерения э. д. с. компенсационным методом.

Наиболее точными методами измерения указанных величин являются компенсационные методы.

Компенсационный метод измерения напряжения (э. д. с.) заключается в сравнении измеряемого напряжения с известным падением напряжения.

Одна из возможных схем дана на рис. 6-1.

Вспомогательный источник питания $E_{всп}$ и реостат $r_{всп}$, а также образцовые сопротивления $r_{AB}(r_n)$ и $r_{BG}(r_n)$ соединенные последовательно, образуют рабочую цепь. При измерении в этой цепи устанавливается рабочий ток I_p . Гальванометр G можно поочередно соединять последовательно с нормальным элементом, являющимся образцовой мерой э. д. с. E_n , или с испытуемым элементом E_x (измеряемым напряжением U_x).

Поставив переключатель гальванометра в положение $НЭ$ и изменяя вспомогательное сопротивление $r_{всп}$, по-

лучим нулевое отклонение подвижной части гальванометра $\alpha_r = 0$. В этом случае э. д. с. нормального элемента уравнивается или компенсируется падением напряжения, созданным рабочим током на сопротивлении r_{aB} , следовательно, можно написать:

$$E_H = I_p r_{aB} = I_p r_H,$$

откуда точно определяется значение установленного рабочего тока

$$I_p = \frac{E_H}{r_H}.$$

Поставив переключатель гальванометра в положение X и перемещая контакты $вг$, установим подвижную часть гальванометра в нулевое положение ($\alpha_r = 0$). В этом случае э. д. с. испытуемого элемента (или измеряемое напряжение) компенсируется падением напряжения, созданным рабочим током на компенсационном сопротивлении $r_K = r_{вг}$, следовательно,

$$E_x = I_p r_{вг} = I_p r_K.$$

Поделив почленно последнее уравнение на предыдущее, получим:

$$\frac{E_x}{E_H} = \frac{r_K}{r_H},$$

откуда и определяется измеряемая э. д. с. (напряжение)

$$E_x = \frac{E_H}{r_H} r_K = I_p r_K.$$

Преимущество компенсационного метода измерения заключается в том, что, во-первых, в моменты измерения (компенсации) токи в испытуемом и нормальном элементах равны нулю; во-вторых, измеряемая величина определяется через э. д. с. нормального элемента и образцовые сопротивления, выполненные с высокой точностью [см. (2-1) и (2-2)].

Для получения результатов измерения, например с точностью до 0,02%, необходимо иметь возможность устанавливать компенсационное сопротивление r_K с точностью до пятого знака.

Для повышения точности установки и отсчета сопротивления r_k применяются схемы с заменяющими декадами или с шунтирующими декадами.

На рис. 6-2 для примера показана последовательная схема с тремя замещающими декадами. Замещающими называют две декады с одинаковыми значениями сопротивлений катушек, движки которых связаны механически, а схема соединения обеспечивает при любом поло-

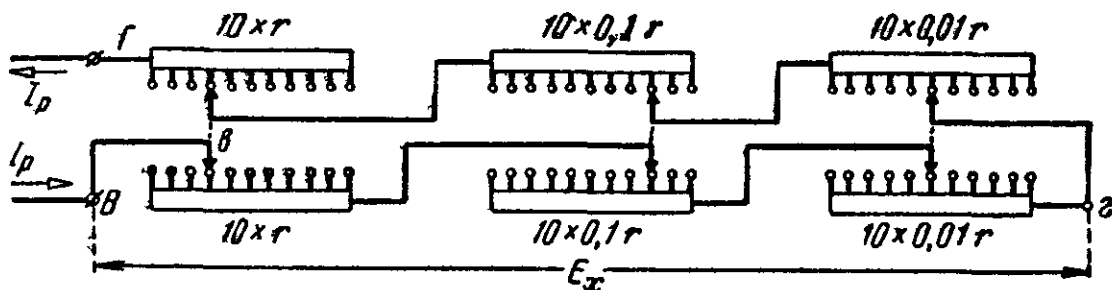


Рис 6-2. Схема трех замещающих декад

жении движков включение в цепь тока только десяти катушек из двух декад. При перемещении движков замещающих декад каждая выключенная из цепи катушка одной декады одновременно замещается катушкой другой декады. Таким образом, сопротивление цепи $r_{вг}$ а следовательно, и рабочий ток не меняются. При этом сопротивление части цепи $r_{вг}$, состоящей из трех декад (рис. 6-2, в нижнем ряду), изменяется, изменяется и падение напряжения на этой части цепи, которое уравнивает измеряемую э. д. с. E_x (или напряжение U_x).

Если сопротивление катушек в каждой последующей декаде в 10 раз меньше сопротивления катушек в предыдущей, то три замещающие декады дают возможность установить компенсационное сопротивление цепи $r_{вг}$, а следовательно, и напряжение на ней с точностью до трех знаков. Увеличивая число декад, можно увеличить число знаков установки сопротивления, а следовательно, и напряжения.

На рис. 6-3 показана схема с шунтирующей декадой.

Магазин сопротивлений r_1 состоит, например, из 11 катушек по 1 000 ом, магазин сопротивлений r_2 — из 9 таких же катушек и может быть подключен параллельно любой из катушек сопротивления r_1 .

Обозначив ток в первом магазине сопротивлений I_p , а во втором I'_p , для разветвления, состоящего из магазина r_2 и одной из катушек магазина r_1 , можно написать:

$$I'_p \cdot 9\,000 = I_p \frac{1\,000 \cdot 9\,000}{1\,000 + 9\,000},$$

откуда

$$I'_p = \frac{1}{10} I_p.$$

Таким образом, падение напряжения на каждой катушке магазина r_2 будет в 10 раз меньше, чем на катушке сопротивления магазина r_1 . Положение движков θ , θ' , θ'' не влияет на величину рабочего тока.

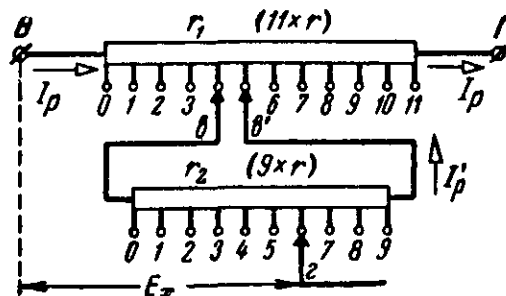


Рис. 6-3. Схема шунтирующей декады.

Рассмотренная схема с шунтирующей декадой дает возможность установить напряжение между зажимами ВГ с точностью до двух знаков. Так, например, при указанных выше значениях сопротивлений катушек и рабочем токе $I_p = 0,1$ ма, при положении движков, показанном на рис. 6-3, напряжением $U_{Bz} = 0,46$ в.

Если последовательно с рассмотренной цепью соединить вторую, аналогичную ей, с подобранными соответствующим образом сопротивлениями, то станет возможным установка напряжения с точностью до четырех знаков.

Схема с замещающими декадами обеспечивает получение результатов с большей точностью по сравнению с шунтирующими декадами, и поэтому, несмотря на большое число катушек сопротивления, необходимое для получения результатов с одинаковым числом знаков, замещающие декады получили за последнее время широкое применение.

6-2. ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Потенциометры — это приборы сравнения для измерения разности потенциалов. Они часто называются компенсаторами, так как в основе их работы лежит компенсационный метод измерения напряжения или э. д. с.

Потенциометры в основном можно разделить на две группы. Потенциометры большого сопротивления или многоомные и потенциометры малого сопротивления или малоомные.

У первых сопротивление рабочей цепи составляет несколько десятков килоом, у вторых — не превышает обычно одного или нескольких килоом.

Первые применяются для измерения напряжения или э. д. с., не превышающих нескольких вольт, и в основном используются для проверки приборов классов точности 0,1—0,5, а также для точных измерений напряжения, тока, сопротивлений и т. д.

Вторые применяются для измерения малых напряжений или э. д. с. примерно до 0,1 в.

Из большого числа потенциометров, получивших широкое распространение, рассмотрим потенциометры ППТВ-1 и Р-300.

а) Потенциометр постоянного тока высокоомный типа ППТВ-1

Схема потенциометра типа ППТВ-1 дана на рис. 6-4.

К зажимам потенциометра *НЭ* подключается нормальный элемент, к зажимам *Х* — измеряемое напряжение, к зажимам *Г* — гальванометр. Для получения рабочего тока к зажимам *ВБ* (вспомогательная батарея) подключается источник питания (обычно аккумулятор).

Для установки номинального рабочего тока $I_p = 0,1$ ма переключатель гальванометра устанавливают в положе-

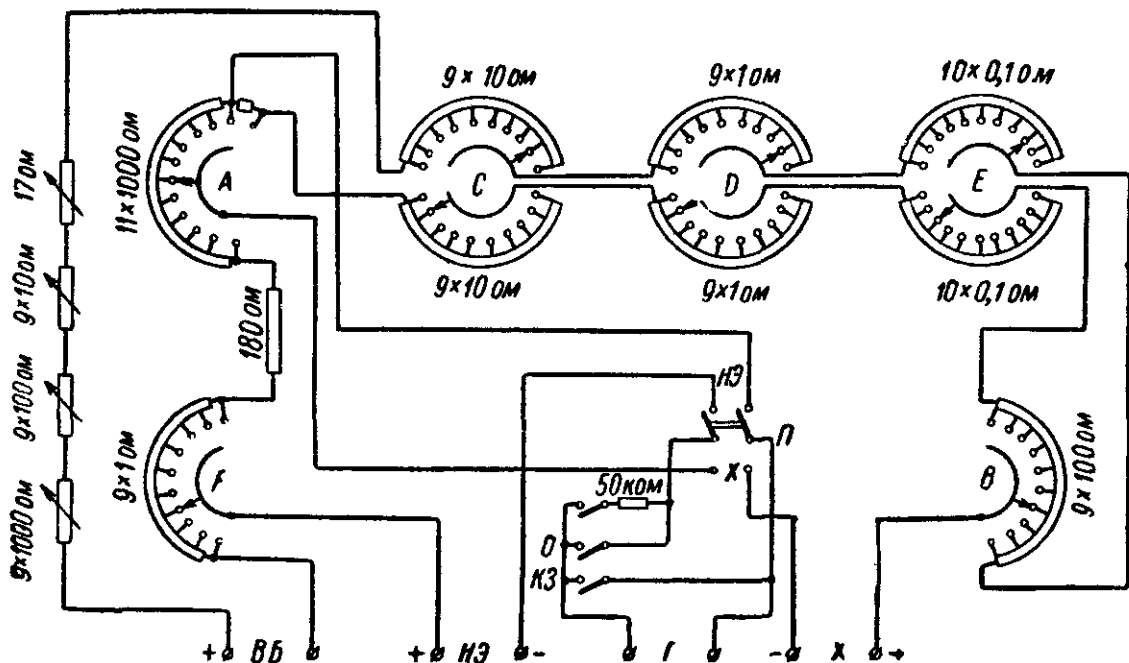


Рис. 6-4. Схема потенциометра ППТВ-1.

нии НЭ, при этом гальванометр будет соединен последовательно с нормальным элементом, и на зажимах этой цепи будет напряжение, равное падению напряжения, созданному рабочим током компенсатора на сопротивлении r_n , состоящем из 10 катушек по 1 000 ом — магазина A , сопротивления 180 ом и части сопротивления магазина F . Число ом этой части сопротивления должно быть равно четвертому десятичному знаку найденного для данной температуры значения э. д. с. нормального элемента.

Регулировка рабочего тока производится при помощи сопротивления $r_{всп}$ — трехдекадного магазина сопротивлений $9 \times 1\,000 + 9 \times 100 + 9 \times 10$ и переменного сопротивления 17 ом.

При нулевом показании гальванометра рабочий ток компенсатора будет иметь номинальное значение 0,1 ма.

После этого переключатель гальванометра переводится в положение X , и компенсатор готов для измерения напряжения (э. д. с.).

Компенсация измеряемой величины выполняется при помощи сопротивления r_k , состоящего из пяти декад сопротивлений. Декада A имеет 11 катушек по 1 000 ом, падение напряжения на каждой из них 0,1 в. Декада B имеет 9 катушек по 100 ом, падение напряжения на каждой из которых 0,01 в. Каждая из декад C , D и E замещающие, вследствие чего сохраняется постоянство сопротивления рабочей цепи компенсатора. Декады C и D имеют по 9 катушек сопротивления, а декада E — 10 катушек, значение сопротивлений катушек соответственно 10,1 и 0,1 ом, а падения напряжения на них 0,001; 0,0001 и 0,00001 в. Величины падений напряжения на каждой катушке указаны у ручек соответствующих декад. Номинальное падение напряжения на пяти декадах — номинальное напряжение компенсатора — 1,2 в.

Включение гальванометра производится сначала через защитное сопротивление 50 000 ом, для чего нажимается кнопка с отметкой 50 000. Затем после регулировки сопротивления $r_{всп}$ или r_k и установки светового указателя гальванометра на нуль шкалы гальванометр включается непосредственно без защитного сопротивления путем нажатия кнопки с отметкой 0. При нажатии кнопки с отметкой КЗ гальванометр замыкается накоротко для достижения быстрого успокоения.

б) Потенциометр типа Р-300

Схема потенциометра типа Р-300 дана на рис. 6-5.

К зажимам *НЭ* потенциометра присоединяется нормальный элемент, к зажимам *Г* — гальванометр.

Рабочий ток потенциометр получает от внутренней — встроенной или наружной батареи элементов или аккумуля-

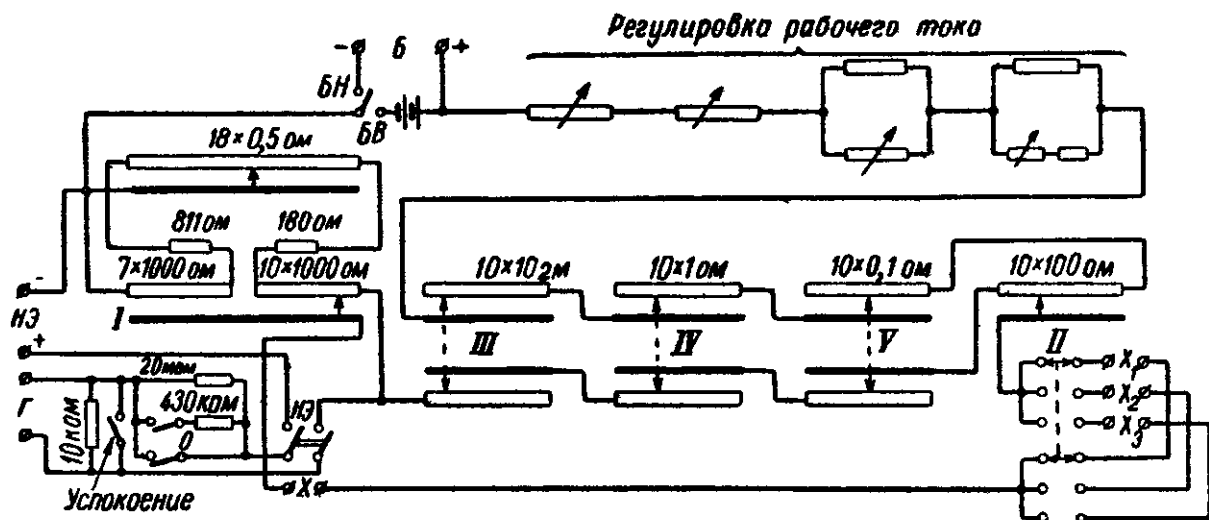


Рис. 6-5. Схема потенциометра Р-300.

мулятора. В первом случае переключка ставится в положение *БВ*, во втором — в *БН*, а батарея присоединяется к зажимам *Б*.

Устройство для регулирования рабочего тока — сопротивление $r_{всп}$ имеет четыре ступени, две из них с рычажными переключателями ($17 \times 855 \text{ ом}$ и $17 \times 53,5 \text{ ом}$) для грубой регулировки и две ступени с реохордами для плавной регулировки.

Для установки номинального рабочего тока компенсатора $0,1 \text{ ма}$ переключатель гальванометра устанавливается в положение *НЭ*. При этом гальванометр соединен последовательно с нормальным элементом и на зажимах этой цепи напряжение равно падению напряжения, созданному рабочим током на сопротивлении $r_{н}$, состоящем из $10 \times 1000 \text{ ом} + 180 \text{ ом}$ и части сопротивления магазина $18 \times 0,5 \text{ ом}$, число ом которого берется равным четвертому десятичному знаку найденного для данной температуры значения э. д. с. нормального элемента. При нулевом показании гальванометра рабочий ток компенсатора будет иметь номинальное значение $0,1 \text{ ма}$.

После этого переключатель гальванометра переводят в положение X .

Потенциометр имеет три пары зажимов X_1 , X_2 и X_3 для присоединения трех измеряемых напряжений или э. д. с. Включение той или иной измеряемой величины в компенсационную цепь производится при помощи переключателя.

Компенсация измеряемой величины выполняется при помощи сопротивления r_k , состоящего из пяти декад сопротивлений. Декада I имеет 18 катушек с сопротивлениями по 1 000 ом, падение напряжения на каждой катушке 0,1 в. Декада II состоит из 10 катушек по 100 ом, падение напряжения на каждой катушке 0,01 в. Декады III , IV и V — замещающие, они имеют по 10 включенных катушек, значение сопротивлений которых соответственно 10,1 и 0,1 ом и падения напряжения на которых 0,001; 0,0001 и 0,00001 в. Номинальное падение напряжения на пяти декадах — номинальное напряжение компенсатора — 1,911 в.

При трех ненажатых кнопках с отметками 0, 430 ком и «Успокоение» последовательно с гальванометром включено сопротивление 20 Мом. При нажатии кнопки с отметкой 430 ком гальванометр включается через защитное сопротивление 430 ком, а при нажатии кнопки с отметкой 0 — без защитного сопротивления. При нажатии кнопки с отметкой «Успокоение» гальванометр замыкается накоротко, чем достигается быстрое успокоение.

6.3. РАБОТА С ПОТЕНЦИОМЕТРОМ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

При работе с потенциометром постоянного тока следует придерживаться следующей последовательности выполнения операций:

1. Ознакомиться детально с потенциометром и его схемой.
2. Измерить температуру окружающей среды и подсчитать э. д. с. нормального элемента.
3. Установить значение сопротивления r_n в соответствии с найденным значением э. д. с.
4. Определить наименьшую необходимую э. д. с. вспомогательной батареи $E_{всп}$ и выбрать батарею с ближайшим стандартным напряжением (э. д. с.).

5. Определить все элементы и параметры цепи измеряемой величины (цепи с измеряемым напряжением, током или сопротивлением, цепи поверяемого амперметра и т. д.) и выбрать их.

6. Собрать схему в соответствии с заданием, строго соблюдая полярность всех элементов схемы.

7. Установить движки всех реостатов, магазинов сопротивлений и переключатели в их исходные положения.

8. Включить осветитель зеркального гальванометра и отрегулировать отсчетное и оптическое устройства, установить световую отметку на нуль шкалы.

9. При положении переключателя гальванометра на отметке *НЭ* замкнуть цепь гальванометра через защитное сопротивление и, изменяя сопротивление $r_{всп}$, установить световую отметку на нуль шкалы гальванометра.

10. После установки световой отметки на нуль шкалы при защитном сопротивлении отрегулировать сопротивление $r_{всп}$ так, чтобы установить световую отметку на нуль шкалы при замыкании гальванометра без защитного сопротивления, тем самым устанавливается номинальная величина рабочего тока компенсатора $0,1\text{ ма}$.

11. Перевести переключатель гальванометра в положение *Х*.

12. Подготовить и проверить цепь измеряемой величины.

13. Определив или зная ориентировочно значение измеряемой величины $U_x(E_x)$, установить движки магазинов сопротивлений (r_k) в положения, соответствующие этой величине.

14. Включив гальванометр сначала через защитное сопротивление, установить световую отметку его на нуль шкалы, затем установить световую отметку на нуль шкалы, включая гальванометр без защитного сопротивления, и определить значение измеряемой величины.

15. Переведя переключатель гальванометра в положение *НЭ*, убедиться в том, что рабочий ток компенсатора остался неизменным.

Потенциометры постоянного тока применяются для измерений напряжений и э. д. с., токов, сопротивлений (см. § 9-7) и для проверок образцовых приборов — амперметров, вольтметров, ваттметров.

Наибольшее напряжение, которое непосредственно может быть измерено потенциометром, не превышает обычно 1,2—2 в.

При измерении больших напряжений пользуются делителем напряжений, схема которого дана на рис. 6-6.

Применение делителя напряжения основано на том, что при прохождении тока по последовательно соеди-

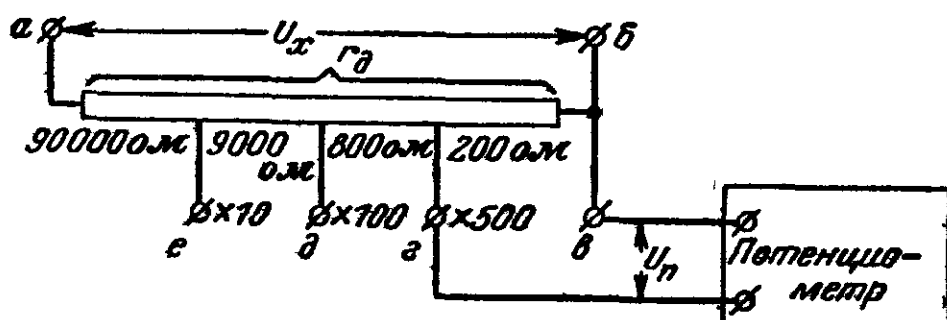


Рис. 6-6. Схема делителя напряжения.

ненным участкам цепи падения напряжения на них будут пропорциональны сопротивлениям этих участков.

Измеряемое напряжение U_x , приложенное к сопротивлению делителя r_d (зажимы ab), можно определить через напряжение U_n , измеряемое потенциометром на части сопротивления делителя r , т. е.

$$U_x = U_n \frac{r_d}{r} = U_n k,$$

где $k = \frac{r_d}{r}$ — коэффициент делителя.

Так, например, для часто встречающихся значений сопротивлений делителя (рис. 6-6) $r_d = 100\,000\text{ Ом}$, $r_{вг} = 200\text{ Ом}$, $r_{вд} = 1\,000\text{ Ом}$ и $r_{вз} = 10\,000\text{ Ом}$ получим:

$$k_{вг} = \frac{r_d}{r_{вг}} = \frac{100\,000}{200} = 500; \quad k_{вд} = \frac{r_d}{r_{вд}} = \frac{100\,000}{1\,000} = 100;$$

$$k_{вз} = \frac{r_d}{r_{вз}} = \frac{100\,000}{10\,000} = 10.$$

Принимая номинальное напряжение потенциометра $U_n = 1,2\text{ в}$, при использовании различных зажимов дели-

теля получаем наибольшие возможные для измерения напряжения:

$$U_x = U_{\pi} k_{\text{вз}} = 1,2 \cdot 500 = 600 \text{ в};$$

$$U_x = U_{\pi} k_{\text{вд}} = 1,2 \cdot 100 = 120 \text{ в}$$

и

$$U_x = U_{\pi} k_{\text{вб}} = 1,2 \cdot 10 = 12 \text{ в}.$$

Для измерения компенсатором тока в какой-либо цепи, в эту цепь необходимо включить образцовую катушку сопротивления r_0 (рис. 6-7).

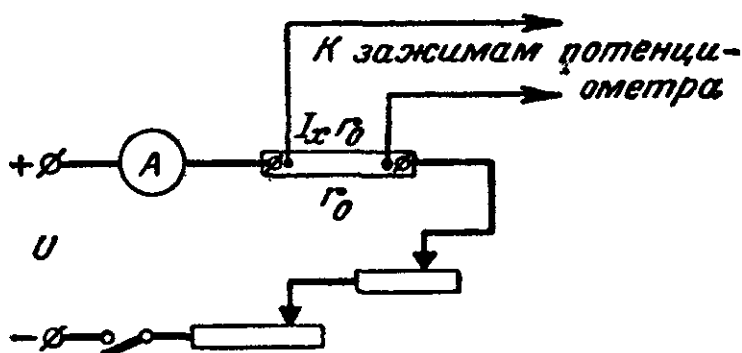


Рис. 6-7. Схема измерения тока потенциометром.

Измерив компенсатором падение напряжения U_0 , созданное измеряемым током I_x на этой катушке, величину тока определяют по формуле

$$I_x = \frac{U_0}{r_0}.$$

Сопротивление катушки должно быть таким, чтобы падение напряжения на катушке при наибольшем значении измеряемого тока было по возможности близким к номинальному напряжению потенциометра, но не превышало его, т. е.

$$r_0 \leq \frac{U_{\pi}}{I_x}.$$

Кроме того, мощность потерь в катушке при наибольшем значении измеряемого тока не должна превышать значений, указанных на катушке (см. § 2-2).

6-4. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

В автоматических потенциометрах установка рабочего тока и уравнивание измеряемой э. д. с. или напряжения происходит автоматически.

Автоматические потенциометры дают возможность непрерывно производить процесс измерения величины э. д. с. или функциональ-

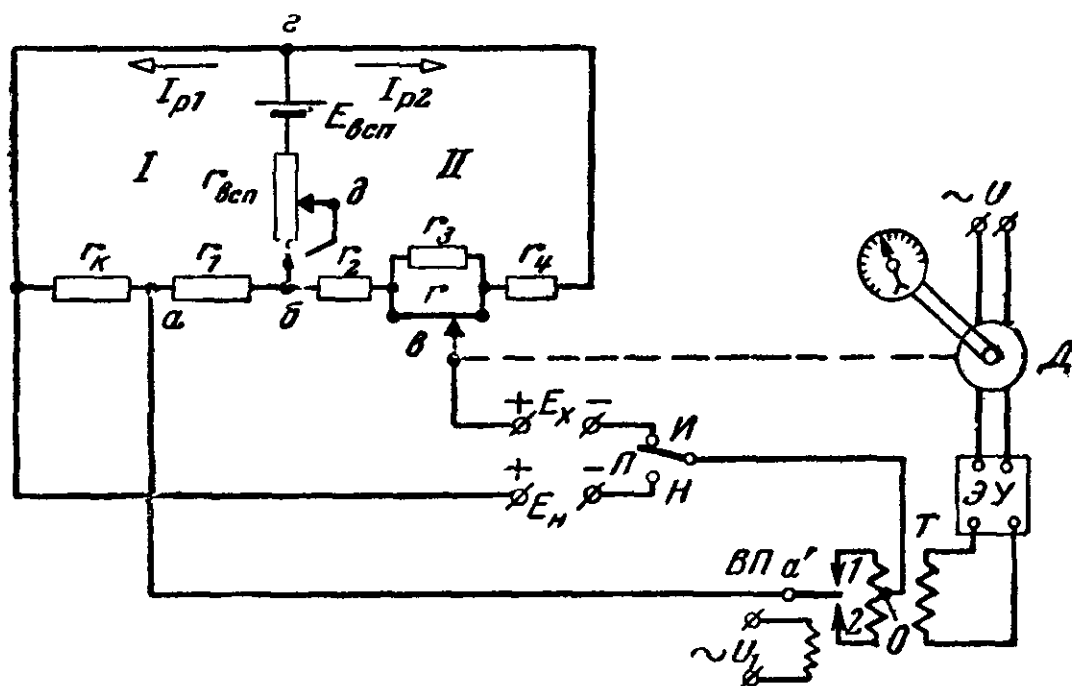


Рис. 6-8. Схема автоматического электронного потенциометра.

но связанной с ней неэлектрической величины, например температуры, регистрировать значение измеряемой величины, а также регулировать ее.

В качестве примера рассмотрим упрощенную схему (рис. 6-8) отечественного автоматического электронного потенциометра с записью на дисковой диаграмме типа ЭПД. В этом потенциометре две рабочие цепи, токи которых I_{p1}, I_{p2} создаются одним вспомогательным источником $E_{всп}$ и регулируются реостатом $r_{всп}$. При измерении переключатель Π ставится в положение $И$. Измеряемая э. д. с. E_x уравнивается напряжением $U_{ав}$ между точками a и b , принадлежащими рабочим цепям. Если э. д. с. E_x и напряжение $U_{ав}$ не равны, то на участке цепи $aa'o$ и bb' возникает ток, направление которого определяется направлением большей из величин E_x или $U_{ав}$. На этом участке цепи, кроме измеряемой величины E_x включены первичная обмотка трансформатора T и якорь вибрационного преобразователя $ВП$. При прохождении по обмотке электромагнита преобразователя переменного тока от внешнего источника (U_1) якорь преобразователя совершает колебания. При этом якорь поочередно соединяется с контактами 1 и 2, и ток в этой цепи проходит то по одной, то по другой половине первичной обмотки трансформатора. Во вторичной обмотке трансформатора

тора наводится переменная э. д. с., фаза которой зависит от направления тока в цепи с измеряемой э. д. с. и, следовательно, от того, какая из величин, E_x или $U_{ав}$, имеет большее значение. Вторичное напряжение трансформатора после усиления электронным усилителем ЭУ подается на реверсивный двигатель Д, который приводит в движение движок в, изменяющий сопротивление r , до тех пор, пока не будет достигнута компенсация э. д. с. E_x напряжением $U_{ав}$. Тот же двигатель приводит в движение стрелку показывающего и самопишущего устройства, а также механизм, регулирующий измеряемую величину.

Величины рабочих токов компенсатора должны быть неизменными при измерении э. д. с. E_x .

Для установки и регулировки рабочих токов переключатель П следует ставить в положение Н. При этом ось редуктора двигателя Д расцепляется с движком в и сцепляется с движком д вспомогательного реостата $r_{всп}$. Электродвижущая сила нормального элемента E_n должна быть при этом компенсирована падением напряжения U_n , созданным рабочим током $I_{р1}$ на компенсационном сопротивлении r_k , так как это соответствует номинальной величине рабочего тока $I_{р1}$. Если этой компенсации нет, то в цепи вибрационного преобразователя и трансформатора пойдет ток, вследствие чего во вторичной обмотке трансформатора будет индуцироваться э. д. с., которая после усиления воздействует на двигатель Д, вызывая его вращение. При этом изменяется сопротивление реостата $r_{всп}$ цепи рабочих токов $I_{р1}$ и $I_{р2}$. Вращение двигателя происходит до тех пор, пока не будет получена номинальная величина рабочего тока $I_{р1}$ и, следовательно, компенсация э. д. с. E_n напряжением U_n .

Точность автоматических конденсаторов $\pm 0,5\%$.

Автоматические потенциометры применяются преимущественно для измерений, записи и регулирования температуры, работая в комплекте с термопарами или радиационными пирометрами. Они используются также для измерения записи регулирования ряда других электрических и неэлектрических величин, при этом применяются соответствующие преобразователи, преобразующие измеряемую величину в напряжение или э. д. с. постоянного тока.

6-5. ПОТЕНЦИОМЕТРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В потенциометре переменного тока, так же как и в потенциометре постоянного тока, измеряемая э. д. с. компенсируется (уравновешивается) известным напряжением, созданным рабочим током.

Потенциометры переменного тока имеют значительно меньшую точность по сравнению с потенциометрами постоянного тока. Это объясняется тем, что рабочий ток потенциометра устанавливается по амперметру электродинамической системы (класса 0,1 или 0,2), так как отсутствует точная мера переменной э. д. с., подобная нормальному элементу.

Так как переменная величина определенной частоты характеризуется амплитудным или действующим значением и фазой, то и компенсирующее напряжение в потенциометре переменного тока должно регулироваться по величине и фазе. Такую регулировку можно получить двумя путями.

В первом случае можно производить регулировку величины напряжения и независимо от этого его фазы, для

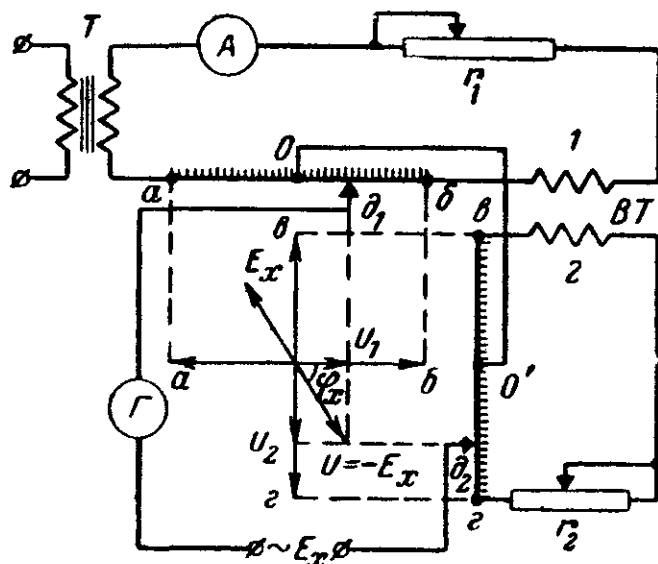


Рис 6-9 Принципиальная схема прямо-
угольно-координатного потенциометра.

чего применяются фазорегуляторы. Такие потенциометры называются полярными, так как определение вектора компенсирующего напряжения производится в полярной системе координат.

Во втором случае можно производить регулировку компенсирующего напряжения путем независимых друг от друга регулировок двух составляющих напряжения, сдвинутых по фазам на угол 90° . Так как в этих потенциометрах определение вектора компенсирующего напряжения производится по двум составляющим, расположенным по взаимно перпендикулярным координатным осям, то они получили название прямоугольно-координатных (комплексных) потенциометров.

Принципиальная схема прямоугольно-координатного потенциометра дана на рис. 6-9.

Потенциометр имеет две рабочие цепи. Первая состоит из амперметра, реостата r_1 , первичной обмотки воздушного трансформатора (BT) и калиброванной про-

волокни ab . Она питается от вторичной обмотки трансформатора (T), первичная обмотка которого подключается к сети переменного тока.

При постоянной величине рабочего тока этой цепи постоянным будет и напряжение U_{ab} на калиброванной проволоке; следовательно, на шкале, расположенной вдоль проволоки, могут быть нанесены деления, дающие значения напряжения, соответствующие различным отрезкам длины этой проволоки.

Вторая рабочая цепь образована вторичной обмоткой воздушного трансформатора, реостатом r_2 и калиброванной проволокой $вг$.

Ток I_1 , проходя по первичной обмотке воздушного трансформатора, создает магнитный поток, совпадающий с ним по фазе (рис. 6-10). Этот поток наводит во вторичной обмотке э. д. с. E_2 , отстающую по фазе от тока I_1 на 90° .

Ввиду малости реактивного сопротивления второй цепи по сравнению с ее активным сопротивлением ток I_2 практически совпадает по фазе с э. д. с. E_2 и, следовательно, отстает от I_1 на угол 90° . Падение напряжения на калиброванной проволоке $U_{вг}$ при постоянной величине рабочего тока I_2 будет постоянным и сдвинутым по фазе относительно U_{ab} на 90° . На шкале, расположенной вдоль калиброванного провода $вг$, нанесены деления, дающие значения напряжения, соответствующие различным отрезкам длины этой проволоки.

Середины калиброванных проволок (точки OO') соединены между собой, и следовательно, напряжение между ними равно нулю.

Если движки установлены на серединах проволок, т. е. в точках OO' , то напряжение между ними отсутствует. Оставив движок δ_2 в точке O' , начнем перемещать движок δ_1 вправо; тогда между движками появится напряжение, совпадающее по фазе с напряжением $U_{ба}$, величину которого можно отсчитать по шкале. Если движок δ_1 перемещать в противоположную сторону от точки O , то напряжение между теми же движками

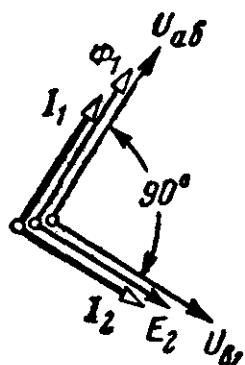


Рис. 6-10. Векторная диаграмма для потенциометра, изображенного на рис. 6-9,

будет сдвинуто по фазе 180° от напряжения U_{6a} . Аналогично, оставив движок d_1 в точке O и перемещая движок d_2 вверх от точки O' , получим между движками напряжение, совпадающее по фазе с U_{a2} ; перемещая движок d_2 вниз от точки O' , получим напряжение, имеющее противоположную фазу. Таким образом, напряжения, полученные нами в рассмотренном случае, могут быть представлены векторами, расположенными по осям топографической диаграммы (рис. 6-9). Если допустить, что движки находятся в положениях, указанных на рис. 6-9, то напряжение U между ними определится вектором, равным геометрической сумме двух векторов U_1 и U_2 . Модуль этого напряжения

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2},$$

а тангенс угла между векторами

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{-U_2}{U_1}.$$

Если бы при рассмотренном положении движков между ними действовала измеряемая э. д. с. E_x и был включен гальванометр, указывающий на отсутствие тока ($\alpha_r = 0$) в его цепи, то, очевидно, имела бы место компенсация э. д. с. E_x известным нам напряжением U . Это обозначало бы, что по величине $E_x = U$, а фазы их противоположны (рис. 6-9).

Из рассмотренного ясно, что при помощи потенциометра представляется возможным определить э. д. с. и напряжение переменного тока как по величине, так и по фазе.

На рис. 6-11 дана упрощенная схема отечественного потенциометра переменного тока типа Р-56.

В цепь рабочего тока включены: шунт $r_{ш}$, первичная обмотка воздушного трансформатора ВТ и амперметр класса точности 0,1 или 0,2. Рабочий ток потенциометра $I_p = 0,5$ а.

Параллельно шунту $r_{ш}$ присоединена цепь, состоящая из реохорда с сопротивлением 1 ом и магазина сопротивлений, состоящего из 15 катушек по 1 ом. Если переключатель $П_5$ находится в положении 1, то ток в этой цепи $I_1 = 0,1$ а и напряжение на всем реохорде и каждой

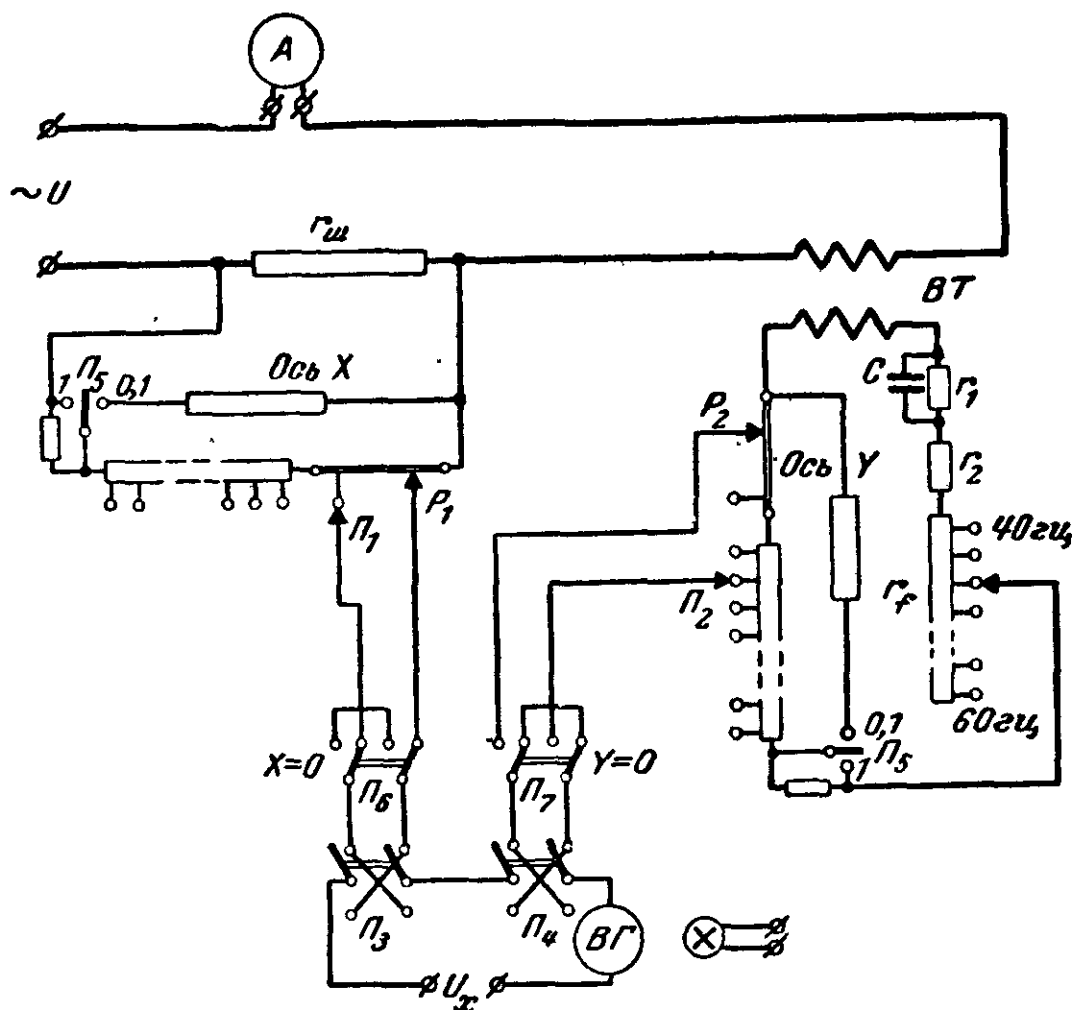


Рис. 6-11. Упрощенная схема потенциометра переменного тока Р-56.

из катушек магазина 0,1 в. Если переключатель Π_5 будет в положении 0,1, то ток и напряжение в цепи реохорд — магазин сопротивлений уменьшатся в 10 раз. Напряжение между движками Π_1 , P_1 уравнивает одну из слагаемых измеряемого напряжения.

Во вторичной цепи воздушного трансформатора включены: реохорд с сопротивлением 10 ом и магазин сопротивлений, состоящий из 15 катушек по 10 ом. Если переключатель Π_5 находится в положении 1, то ток в этой цепи 0,01 а, а напряжение на всем реохорде и на каждой катушке магазина 0,1 в. Если переключатель Π_5 находится в положении 0,1, то ток и напряжение в цепи реохорд-магазин сопротивлений уменьшаются в 10 раз. Напряжение между движками Π_2 и P_2 уравнивает вторую слагающую измеряемого напряжения, сдвинутую по фазе относительно первой на 90° . Кроме того, во вторичной цепи трансформатора включены сопротивления

r_2 и r_1 , шунтированные емкостью C , обеспечивающие сдвиг в 90° тока этой цепи относительно тока первой цепи. Сопротивление r_f предназначено для поддержания неизменным тока этой цепи при изменении частоты в пределах от 40 до 60 гц.

Переключатели P_3 и P_4 дают возможность изменять на 180° фазы слагающих измеряемого напряжения, подлежащих компенсации, и, следовательно, дают возможность уравновесить измеряемое напряжение независимо от того, в каком квадранте координатных осей находится вектор измеряемого напряжения.

Для расширения предела измерения напряжения применяется делитель напряжения с номинальными напряжениями 3—7,5—15—30—75—150 и 300 в.

Потенциометр присоединяется к сети через питающий изолирующий трансформатор (рис. 6-9).

6-6. ЦИФРОВЫЕ ПРИБОРЫ

Цифровой прибор представляет собой измерительное устройство, в котором при непрерывном изменении измеряемой величины она оценивается дискретной величиной — числом с определенным количеством (3—4) значащих цифр, отсчитываемым непосредственно на его отсчетном устройстве, подобно отсчету по счетчику электроэнергии (см. § 12-2).

Цифровые приборы можно разделить на две группы: электромеханические, в которых автоматизация их работы достигается применением электродвигателей, реле, шаговых искателей и других электромеханических устройств, и электронные, в которых используются устройства импульсной техники и измеряемая величина преобразуется в пропорциональное ей число импульсов.

Из приборов первой группы наибольшее распространение получили вольтметры и омметры, основанные на применении автоматических потенциометров (см. § 6-4) и автоматических мостов (см. § 9-10). Из приборов второй группы — вольтметры, частотомеры, фазометры.

В цифровых приборах измерение производится нулевым методом — сравнением измеряемой величины с образцовой.

Схемы преобразовательных и компенсационных устройств ввиду их сложности в этой книге не рассматриваются.

В качестве примера рассмотрим структурную схему электромеханического вольтметра рис. 6-12.

Блок компенсации представляет собой многодекадный потенциометр с автоматически переключаемыми постоянными сопротивлениями. Приложенное к входным зажимам этого блока измеряемое напряжение U_x автоматически компенсируется образцовым напряжением U_0 .

Нуль-индикатор представляет собой безынерционный усилитель, обладающий большой чувствительностью.

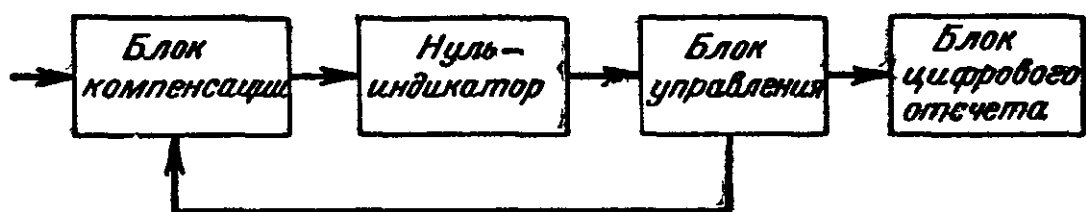


Рис. 6-12. Структурная схема цифрового прибора.

Разность между измеряемым и образцовым напряжениями $\Delta U = U_x - U_0$ после усиления нуль-индикатором в форме сигнала, пропорционального ΔU , воздействует на блок управления.

Блок управления состоит из ряда электромагнитных и бесконтактных транзисторных реле и электромагнитных устройств. По сигналу нуль-индикатора блок управления по цепи обратной связи воздействует на блок компенсации, производя изменение и выбор сопротивлений потенциометра, при которых разность ΔU уменьшается, приближаясь к нулю, т. е. выполняя компенсацию напряжения U_x .

Блок цифрового отсчета может быть выполнен, например, в виде пластин, на которых нанесены прозрачные цифры, освещаемые миниатюрными лампами.

Блок управления, производящий выбор сопротивлений в потенциометре, одновременно включает лампы блока цифрового отсчета, соответствующие числовым значениям выбранных сопротивлений. Эти числовые значения проектируются на экран, на котором и производится отсчет измеряемой величины.

Цифровые вольтметры выпускаются на номинальные напряжения от 100 мкв до 1 000 в. Время одного отсчета не превышает 1 сек.

В сравнении со стрелочными приборами цифровые приборы имеют ряд преимуществ:

1. Показание результатов измерения в числовой форме дает более высокую точность отсчета и более удобное считывание показаний.

2. Обеспечиваются простота и быстрота отсчета, автоматическое определение знака, причем точность отсчета не зависит от угла зрения и от расстояния.

3. Имеется возможность использования числового прибора не только для визуального отсчета, но и для регистрирующих, запоминающих и регулирующих устройств.

Точность цифровых приборов (например, вольтметров) составляет $0,01 \div 1,0\%$.

Использование точных цифровых приборов в сочетании с печатным устройством позволяет полностью автоматизировать процесс измерения и регистрацию его результатов. Цифровые измерительные приборы в сочетании с быстродействующими вычислительными машинами используются для непрерывного контроля и автоматизации производственных процессов, для телеизмерений и т. д.

Из недостатков необходимо отметить сложность устройства и высокую стоимость.

Глава седьмая

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

7-1. НАЗНАЧЕНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Измерительные трансформаторы применяются в цепях переменного тока для расширения пределов измерения измерительных приборов и для изоляции цепей измерительных приборов от проводов высокого напряжения, чем обеспечивается безопасность обслуживания высоковольтных установок. Кроме того, измерительные трансформаторы дают возможность более точного измерения больших токов и высоких напряжений.

Измерительные трансформаторы делятся на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока.

7-2. ТРАНСФОРМАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Измерительные трансформаторы напряжения применяются для расширения пределов измерения напряжения. Они применяются для совместной работы с вольтметрами, ваттметрами, счетчиками и т. д.

Трансформатор напряжения имеет устройство (рис. 7-1), аналогичное устройству силового трансформатора.

Он состоит из замкнутого сердечника, набранного из листовой трансформаторной стали, и двух обмоток.

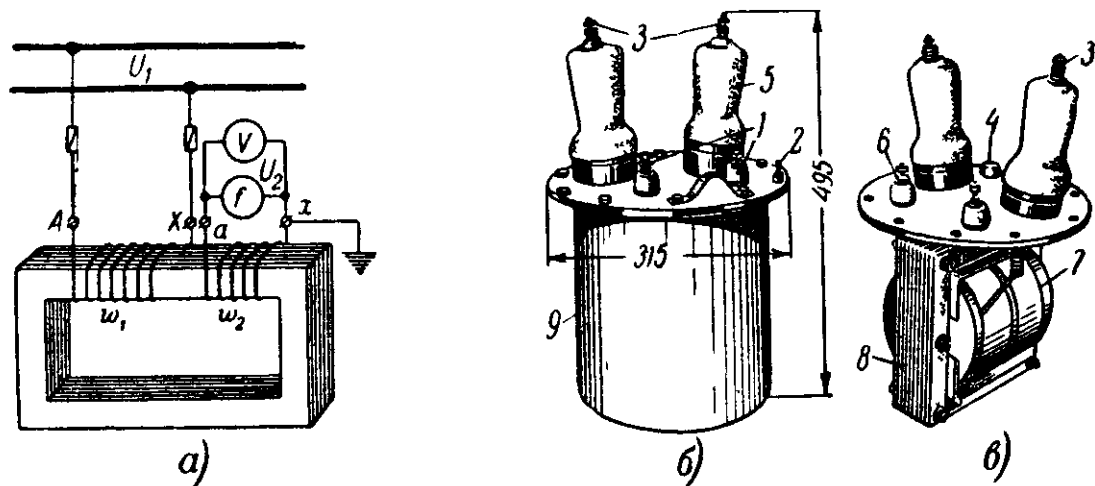


Рис. 7-1. Трансформатор напряжения.

а — устройство трансформатора напряжения и схема его включения; *б* — общий вид трансформатора напряжения типа НОМ-10 для внутренней установки на напряжение 10 кВ, *в* — вид выемной части НОМ-10; 1 — зажимы для присоединения проводов низкого напряжения (н н), 2 — болт заземления, 3 — зажимы для присоединения проводов высокого напряжения (в н); 4 — пробка отверстия для заливки масла, 5 — изоляторы в н; 6 — изоляторы н. и.; 7 — обмотка в н, 8 — магнитопровод, 9 — бак с маслом

Обмотки изолированы относительно сердечника и относительно друг друга. Одна из них — первичная — имеет число витков w_1 , другая — вторичная — w_2 .

Первичная обмотка трансформатора напряжения подключается к сети с измеряемым напряжением; зажимы вторичной обмотки соединяются с вольтметром и цепями напряжения измерительных приборов, последние соединяются между собой параллельно.

Режим работы трансформаторов напряжения характерен тем, что первичное напряжение изменяется незначительно, а вторичная обмотка трансформатора замкнута на большое сопротивление, вследствие чего токи в его обмотках относительно малы и, следовательно, он работает в условиях, близких к холостому ходу.

Если первичная обмотка трансформатора подключена к цепи с измеряемым напряжением, то вольтметр, присоединенный ко вторичной обмотке, измерит вторичное напряжение.

Отношение действительного значения первичного напряжения U_1 к действительному значению вторичного напряжения U_2 называется действительным коэффициентом трансформации трансформатора напряжения

$$k = \frac{U_1}{U_2}. \quad (7-1)$$

Если бы действительный коэффициент трансформатора был известен, то, измерив вторичное напряжение U_2 , можно было бы определить первичное напряжение

$$U_1 = kU_2. \quad (7-2)$$

Но так как действительный коэффициент трансформации обычно неизвестен вследствие того, что он зависит от величины и характера нагрузки, величины напряжения и частоты переменного тока, т. е. от режима работы трансформатора, то первичное напряжение определяют, пользуясь соотношением

$$U'_1 = k_{\text{н}} U_2, \quad (7-3)$$

где U'_1 — найденное приближенное значение искомого напряжения;

$k_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н1}}}{U_{\text{н2}}}$ — номинальный коэффициент трансформации, представляющий собой отношение номинального первичного напряжения к номинальному вторичному напряжению, дается заводом на щитке трансформатора.

Номинальное вторичное напряжение согласно ГОСТ должно быть равно 100 в или $100/\sqrt{3}$ в.

Погрешность при измерении напряжения, обусловленная применением измерительного трансформатора,

$$\begin{aligned} \gamma_U &= \frac{U'_1 - U_1}{U_1} 100\% = \frac{U_2 k_{\text{н}} - U_2 k}{U_2 k} 100\% = \\ &= \frac{k_{\text{н}} - k}{k} 100\% = \gamma_k, \end{aligned} \quad (7-4)$$

где $\gamma_k = \gamma_U$ — погрешность в коэффициенте трансформации или погрешность по напряжению.

Помимо погрешности по напряжению, трансформаторы напряжения обладают еще угловой погрешностью. Угловой погрешностью называется угол δ между вектором первичного напряжения и повернутым на 180° вектором вторичного напряжения (рис. 7-2).

Угловая погрешность считается положительной, если повернутый вектор вторичного напряжения опережает по фазе вектор первичного напряжения.

Угловая погрешность влияет на точность измерения в тех случаях, когда трансформатор применяется совместно с измерительными приборами, показания которых зависят от сдвига фаз между током и напряжением, например ваттметрами, счетчиками и т. д.

Наличие погрешностей в трансформаторе напряжения объясняется наличием падений напряжений в его обмотках. Действительно, если допустить, что падения напряжений в обмотках равны нулю ($I_r = 0$ и $I_x = 0$), то $E_1 = U_1$ и $E_2 = U_2$ (см. векторную диаграмму на рис. 7-2); следовательно,

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{U_{н1}}{U_{н2}} = k = k_n$$

и погрешность по напряжению равна нулю при всех режимах работы.

Кроме того, при указанном допущении вектор U_1 совпадает с вектором E_1 , вектор E_2 совпадает с вектором U_2 . Следовательно, угол между вектором первичного напряжения и повернутым на 180° вектором вторичного напряжения равен нулю, т. е. угловая погрешность равна нулю.

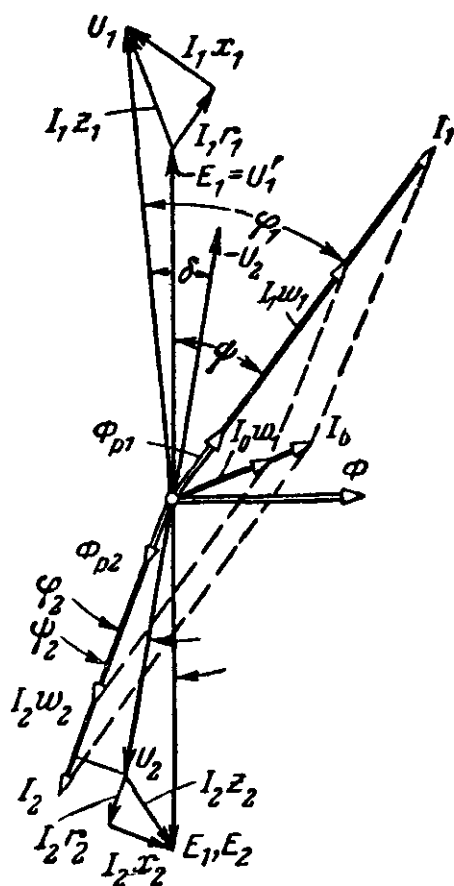


Рис 7-2. Векторная диаграмма трансформатора напряжения, построенная в предположении, что $\omega_1 = \omega_2$.

Так как погрешности трансформатора напряжения обусловлены наличием падений напряжений в его обмотках, то, очевидно, они зависят от тех же величин, от которых зависят и падения напряжений. Следовательно,

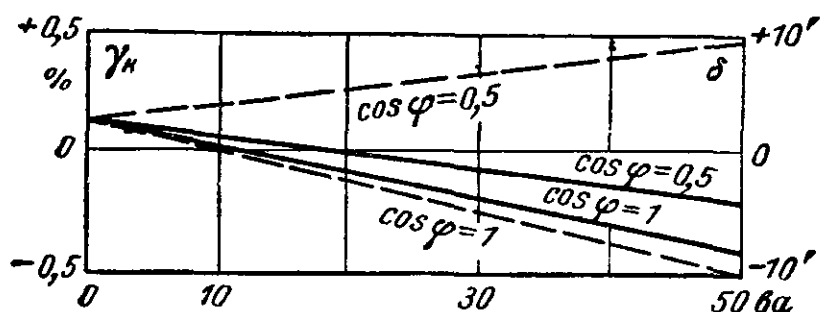


Рис. 7-3. Кривые погрешностей в коэффициенте трансформации (сплошные кривые) и угловых погрешностей (пунктирные кривые) трансформатора напряжения в зависимости от нагрузки вторичной цепи при разных $\cos \varphi$.

погрешности трансформатора зависят от: сопротивлений обмоток трансформатора r_1, r_2, x_1, x_2 ; тока холостого хода; величины и фазы тока вторичной цепи или, иначе, величины и характера нагрузки вторичной цепи

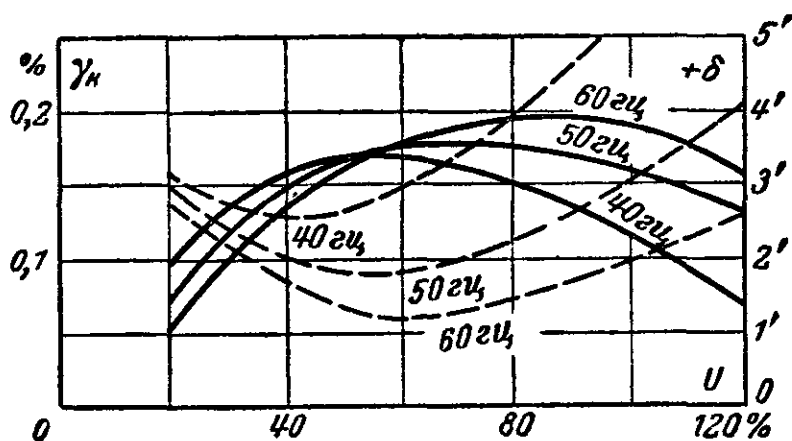


Рис. 7-4. Кривые погрешностей в коэффициенте трансформации (сплошные кривые) и угловых погрешностей (пунктирные кривые) трансформатора напряжения в зависимости от приложенного напряжения при разных частотах.

трансформатора (рис. 7-3); величины первичного напряжения и частоты переменного тока (рис. 7-4).

Для уменьшения активных сопротивлений обмотки изготавливаются из проводов сравнительно большого сечения, т. е. плотности тока берутся малыми.

Для уменьшения реактивных сопротивлений, зависящих от магнитных потоков рассеяния, индукцию в сер-

дечнике берут малой (6 000—10 000 гс); стыки стали делают возможно меньшими и применяют лучшие сорта стали, чем одновременно достигается уменьшение тока холостого хода и потерь в сердечнике.

Та наибольшая (полная) мощность, которую можно получить от трансформатора без увеличения его погрешностей, выше допустимых по стандарту, называется номинальной мощностью трансформатора. Номинальная мощность дается заводом на щитке трансформатора в вольт-амперах. Так как номинальное вторичное напряжение трансформатора известно, то допустимую нагрузку его можно характеризовать не только номинальной мощностью, но и номинальным вторичным током или номинальным сопротивлением вторичной цепи. Эти величины связаны между собой соотношением

$$S_H = I_{H2} U_{H2} = \frac{U_{H2}^2}{Z_{H2}} = I_{H2}^2 Z_{H2}.$$

К трансформатору напряжения можно подключить такое количество приборов, при котором их мощность при номинальном напряжении не превышает номинальной мощности трансформатора.

В табл. 3-4 приведены средние цифры мощности потерь приборов различных систем.

Пример 7-1. Подсчитать, можно ли к трансформатору напряжения номинальной мощности 40 *ва* подключить 1) электромагнитный вольтметр; 2) параллельную обмотку индукционного ваттметра; параллельную обмотку фазометра; 4) частотомер.

Найдя в табл. 3-4 мощности перечисленных приборов и сложив их, получим нагрузку трансформатора

$$S = 6 + 6 + 8 + 5 = 25 \text{ в}а.$$

Так как полученная мощность меньше номинальной мощности трансформатора, то подключение указанных приборов к данному трансформатору допустимо.

Номинальную мощность трансформатора напряжения не следует смешивать с его максимальной мощностью — наибольшей мощностью, которую можно получить от трансформатора, исходя из условий допустимого его нагревания.

Кроме рассмотренных однофазных трансформаторов напряжения, в цепях трехфазного тока применяются

трансформаторы трехфазные. На рис. 7-5 дана схема устройства и включения такого трансформатора. Как видно из схемы, на трех стержнях магнито-провода располагаются три первичные и три вторичные обмотки. Первичные обмотки подключаются к испытываемой сети трехфазного тока, а к вторичным обмоткам подключаются измерительные приборы.

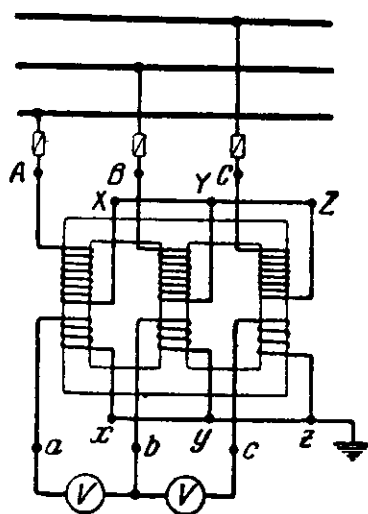


Рис. 7-5. Схема устройства и включения трехфазного трансформатора напряжения.

Все, что было сказано относительно однофазных трансформаторов, относится и к трехфазным.

Для безопасности обслуживающего персонала вторичные обмотки измерительных трансформаторов напряжения всегда должны быть заземлены, как это указано на рис. 7-1. При отсутствии этого заземления при повреждении изоляции первичной обмотки вторичная обмотка, а следовательно, и подключенные к ней приборы могут оказаться под высоким потенциалом относительно земли, что является, безусловно, опасным. Также обычно заземляется и металлический кожух трансформатора.

По степени точности согласно ГОСТ 1983-47 трансформаторы напряжения делятся на четыре класса (табл. 7-1).

По роду изоляции трансформаторы напряжения делятся на сухие и трансформаторы с заливкой изолирующей массой или маслом. Первые строятся для напряжений до 3 000 в, а вторые — для напряжений 3 000 в и выше.

Номинальные данные трансформаторов напряжения согласно ГОСТ 1983-47, приведены в табл. 7-2.

Вес и размеры трансформаторов напряжения быстро растут с увеличением номинальных напряжений их. Вес меди и стали трансформатора растет примерно пропорционально квадрату номинального напряжения.

Мощность трансформатора с увеличением номинального напряжения увеличивается, оставаясь неиспользованной, так как это увеличение обусловливается не на-

Деление трансформаторов напряжения на классы по степени точности

Класс точности трансформаторов напряжения	Максимальные погрешности		Условия нагрузки
	по напряжению, %	угловая, мин	
0,2	$\pm 0,2$	± 10	1. При напряжении $0,9 U_{н1} - 1,1 U_{н1}$ 2. При отдаваемой вторичной обмоткой мощности $0,25 \left(\frac{U_1}{U_{н1}} \right)^2 S_H - \left(\frac{U_1}{U_{н1}} \right)^2 S_H$ (см. табл. 7-2) 3. При частоте 50 гц 4. При $\cos \varphi$ нагрузки, равном 0,8
0,5	$\pm 0,5$	± 20	
1	$\pm 1,0$	± 40	
3	$\pm 3,0$	Не стандартизуется	

Таблица 7-2

Номинальные данные трансформаторов напряжения

Трансформаторы	Номинальное напряжение $U_{н1}$, в	Номинальная мощность S_H , ва			Максимальная мощность трансформатора, ва
		в классе точности 0,5	в классе точности 1	в классе точности 3	
Однофазные двухобмоточные	380; 500	25	40	100	200
	3 000	30	50	120	240
	6 000	50	80	200	400
	10 000; 15 000	80	150	320	640
	35 000	150	250	600	1 200
Трехфазные двухобмоточные	380; 500;	50	80	200	400
	3 000		150	320	640
	5 000	80			
	10 000; 15 000	120	200	480	960

грузкой вторичной цепи, а условиями механической и электрической прочности. По указанным причинам при напряжении порядка 100 кв и выше применяют типы трансформаторов с более рациональным использованием материалов.

Одним из таких типов является каскадный трансформатор напряжения.

В каскадном трансформаторе напряжение распределяется равномерно на ряд элементов. Например, при каскаде, состоящем из трех элементов, и напряжении 110 кВ каждый элемент каскада рассчитывается на $110 \text{ кВ} : 3 = 37 \text{ кВ}$.

Считая вес трансформаторов пропорциональным квадрату напряжения, получаем вес трех трансформато-

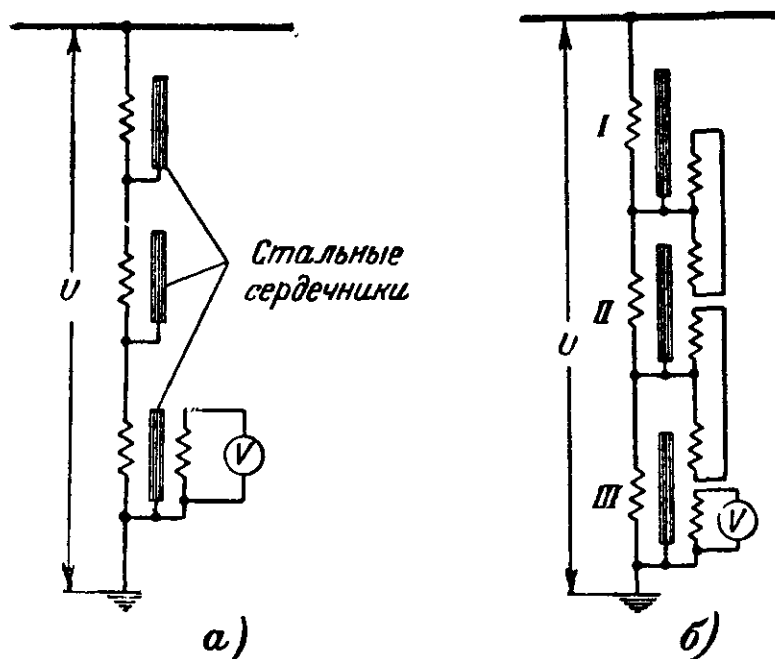


Рис. 7-6. Схемы соединений каскадного трансформатора напряжения.

а — схема простейшего каскада; *б* — схема с равномерным распределением напряжения на элементах при нагрузке.

ров по 37 кВ — в 3 раза меньше веса одного трансформатора на 110 кВ.

Схема простейшего каскада дана на рис. 7-6, *а*; однако такая схема практически неприменима, так как напряжение будет распределяться равномерно только при холостом ходе. При наличии же нагрузки напряжение на элементе, несущем нагрузку, упадет вследствие размагничивающего действия вторичной обмотки. Одновременно напряжение на двух других элементах каскада соответственно возрастает. Для того чтобы при нагрузке распределение напряжения между элементами не изменилось, необходимо во всех элементах каскада иметь одинаковые размагничивающие н. с., чего можно достигнуть различными путями. Одна из возможных схем дана на рис. 7-6, *б*. Вторичная обмотка первого (верхнего) элемента каскада соединена встречно с третичной обмоткой

второго элемента, вторичная обмотка которого соединена с третичной обмоткой третьего элемента, в то время как вторичная обмотка этого элемента замкнута на вольтметр.

Наши заводы, кроме различных типов трансформаторов напряжения, предназначенных для промышленных установок, изготавливают лабораторные переносные трансформаторы напряжения с несколькими номинальными первичными и вторичными напряжениями, например трансформатор напряжения типа УТН-1 класса точности 0,2 с первичными номинальными напряжениями 500; 380 и $\frac{380}{\sqrt{3}}$ в и вторичными номинальными напряжениями 100; $\frac{100}{\sqrt{3}}$ и $\frac{100}{3}$ в. Сюда же относится трансформатор напряжения типа Н-50 также класса точности 0,2 с первичными номинальными напряжениями 15; 10; 6 и 3 кВ и вторичными номинальными напряжениями 100 и $\frac{100}{\sqrt{3}}$ в.

7.3. ТРАНСФОРМАТОРЫ ТОКА

Измерительные трансформаторы тока служат для расширения пределов измерения тока. Они применяются для совместной работы с амперметрами, ваттметрами, счетчиками, приборами защиты и т. д.

Иногда измерительные трансформаторы тока применяются исключительно для изоляции измерительных приборов от проводов высокого напряжения (у таких трансформаторов $I_{H1} = I_{H2}$ коэффициент трансформации $k_H = I_{H1}/I_{H2} = 1$).

Трансформатор тока (рис. 7-7) состоит из замкнутого стального сердечника с наложенными на него двумя обмотками. Одна из них — первичная, обычно с меньшим числом витков, включается в рассечку провода, по которому идет измеряемый ток, а другая — вторичная, с большим числом витков, замыкается на ампер-

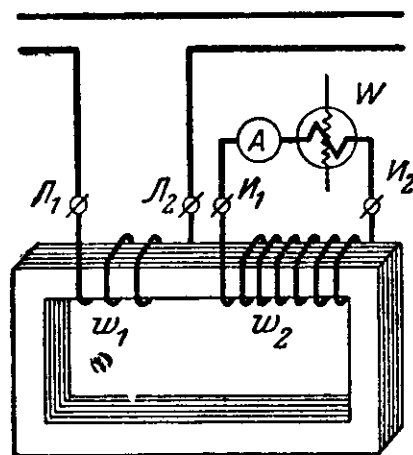


Рис. 7-7. Устройство трансформатора тока и схема его включения.

метр и токовые обмотки измерительных приборов, соединенные между собой последовательно.

Принцип работы трансформатора тока тот же, что и трансформатора напряжения. Но в отличие от последнего трансформатор тока работает в условиях, близких к короткому замыканию, так как сопротивление последовательных обмоток измерительных приборов незначительно (0,2—1,6 ом).

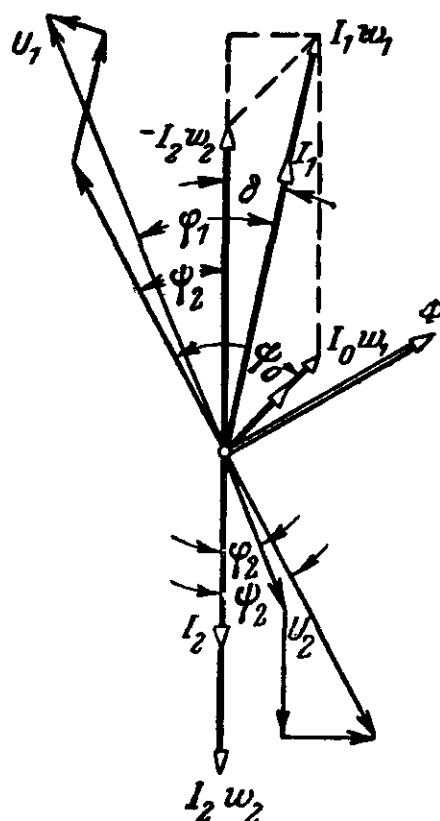


Рис. 7-8. Векторная диаграмма трансформатора тока.

При работе ток в первичной цепи трансформатора тока может изменяться от нуля до номинального, а при коротких замыканиях может превосходить номинальный в десятки раз.

Наконец, в отличие от трансформатора напряжения ток первичной цепи трансформатора тока не зависит от сопротивления вторичной цепи его.

Измеряемый ток I_1 (рис. 7-8), проходя по первичной обмотке, создает н. с. $I_1 w_1$, большая часть которой компенсируется н. с. $I_2 w_2$, а меньшая часть — результирующая н. с. $I_0 w_1$ — возбуждает магнитный поток Φ в стали трансформатора, который и индуцирует во вторичной обмотке э. д. с.

Таким образом, при нормальном режиме работы трансформатора тока н. с. $I_0 w_1$ и магнитный поток в сердечнике весьма незначительны. Это и понятно, так как этот поток должен наводить во вторичной обмотке незначительную э. д. с., необходимую на покрытие активных и реактивных потерь во вторичной обмотке и во вторичной внешней цепи, обладающих малыми сопротивлениями.

Намагничивающая сила $I_0 w_1$ создается намагничивающим током I_0 , практически равным току холостого хода.

Необходимо иметь в виду, что в трансформаторе тока под током холостого хода, соответствующим определенному режиму работы трансформатора, следует пони-

мать ток, который следовало бы пропустить по его первичной обмотке при разомкнутой вторичной для того, чтобы в сердечнике трансформатора создать магнитный поток, равный потоку при данном режиме работы трансформатора.

Если при неизменном токе I_1 увеличивать сопротивление вторичной цепи, то как ток I_2 , так и вторичная н. с. будут уменьшаться, а н. с. $I_0\omega_1$ и магнитный поток Φ будут увеличиваться.

В пределе при размыкании вторичной цепи ($z_2 = \infty$; $I_2 = 0$) вторичная н. с. равна нулю, а результирующая н. с. будет равна первичной н. с.

Но так как при нормальном режиме работы трансформатора первичная н. с. весьма значительна по сравнению с результирующей н. с., то магнитный поток, который установится в сердечнике трансформатора при разомкнутой вторичной цепи, будет во много раз больше нормального потока, на который рассчитан сердечник трансформатора. Вследствие значительного увеличения магнитного потока, а следовательно, и магнитной индукции потери в стали (пропорциональные квадрату индукции) могут возрасти до значений, могущих вызвать чрезмерный нагрев сердечника трансформатора. С другой стороны, большой магнитный поток будет индуцировать во вторичной обмотке э. д. с., достигающую опасных значений (до 2 000 в). Отсюда следует, что вторичная цепь работающего трансформатора тока всегда должна быть замкнута на последовательные обмотки приборов или в их отсутствие накоротко.

Действительным коэффициентом трансформации трансформатора тока называется отношение действительного значения первичного тока I_1 к действительному значению вторичного тока I_2 , т. е.

$$k = \frac{I_1}{I_2}. \quad (7-5)$$

Если бы действительный коэффициент трансформации был известен, то, измеряя вторичный ток I_2 , можно было бы определить первичный ток I_1 по формуле

$$I_1 = kI_2. \quad (7-6)$$

Но так как действительный коэффициент трансформации обычно неизвестен, вследствие того, что он зави-

сит от режима работы трансформатора тока, то для определения искомой величины I_1 пользуются соотношением

$$I'_1 = k_n I_2, \quad (7-7)$$

где I'_1 — найденное приближенное значение первичного тока;

$k_n = \frac{I_{n1}}{I_{n2}}$ — номинальный коэффициент трансформации, данный заводом и представляющий собой отношение номинального первичного тока к номинальному вторичному току трансформатора.

Погрешность при измерении тока, обусловленная применением измерительного трансформатора тока, может быть выражена

$$\begin{aligned} \gamma_I &= \frac{I'_1 - I_1}{I_1} 100\% = \frac{k_n I_2 - k I_2}{k I_2} 100\% = \\ &= \frac{k_n - k}{k} 100\% = \gamma_k, \end{aligned} \quad (7-8)$$

где $\gamma_k = \gamma_I$ — погрешность в коэффициенте трансформации или погрешность по току.

Помимо погрешности по току, трансформатор тока обладает угловой погрешностью.

Угловой погрешностью трансформатора тока называется угол δ между вектором первичного тока и повернутым на 180° вектором вторичного тока. Угловая погрешность считается положительной, если повернутый на 180° вектор вторичного тока опережает вектор первичного тока.

Угловая погрешность влияет на точность измерения в тех случаях, когда трансформатор тока применяется совместно с измерительными приборами, показания которых зависят от сдвига фаз между током и напряжением (ваттметры, счетчики и т. д.).

Величины погрешности в трансформаторе тока зависят от тока холостого хода или, что то же, от результирующей н. с. $I_0 \omega_1$.

Действительно, если допустить, что ток холостого хода $I_0 = 0$, то $I_0 \omega_1 = 0$ и первичная н. с. в точности равна вторичной: $I_1 \omega_1 = I_2 \omega_2$. Следовательно:

- 1) $\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{I_{H1}}{I_{H2}} = k = k_H$ и погрешность по току равна нулю при всех режимах работы трансформатора;
- 2) вектор I_1 совпадает с повернутым на 180° вектором I_2 ; следовательно, угловая погрешность также равна нулю.

Так как погрешности трансформатора тока обусловлены наличием результирующей н. с., то, очевидно, они зависят от тех же величин, от которых зависит и результирующая н. с. $I_0\omega_1$.

Следовательно, погрешности трансформатора зависят:

1) от магнитного сопротивления магнитопровода — магнитной проницаемости стали и размеров сердечника (рис. 7-9);

2) от величины и характера сопротивления вторичной внешней цепи трансформатора [z_2 и $\cos \varphi_2$ (рис. 7-10)];

3) от вторичного тока трансформатора (рис. 7-10);

4) от частоты тока.

Из рассмотрения векторной диаграммы на рис. 7-8 видно, что вследствие малости δ можно вектор первичной н. с. считать равным проекции его на направление вектора вторичной н. с.; следовательно,

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2 + I_0\omega_1 \cos(\psi_0 - \psi_2).$$

Разделив последнее уравнение на $I_2\omega_1$, получим:

$$\frac{I_1\omega_1}{I_2\omega_1} = \frac{I_2\omega_2}{I_2\omega_1} + \frac{I_0\omega_1 \cos(\psi_0 - \psi_2)}{I_2\omega_1},$$

откуда

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} + \frac{I_1 \cos(\psi_0 - \psi_2)}{I_2} = k. \quad (7-9)$$

Погрешность по току (7-8)

$$\gamma_I = \frac{k_H - k}{k} 100\%$$

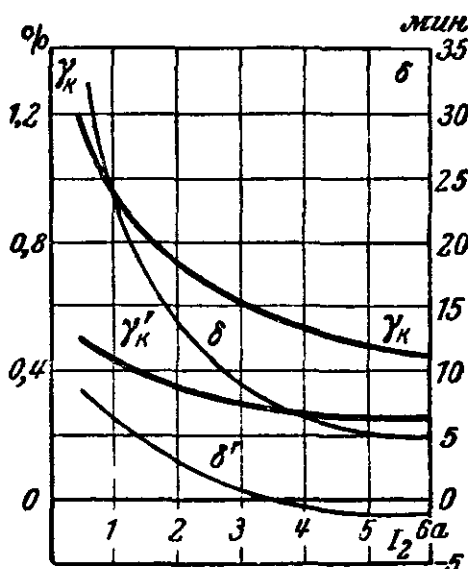


Рис 7-9. Кривые погрешностей двух одинаковых трансформаторов тока. Сердечник одного сделан из простой трансформаторной стали (γ_k и δ); сердечник второго — из специальной стали с большой магнитной проницаемостью (γ'_k и δ').

или с достаточным приближением

$$\gamma_I = \frac{k_H - k}{k_H} 100\% = \left(1 - \frac{k}{k_H}\right) 100\%.$$

Подставив в последнюю формулу вместо k его выражение из (7-9), получим:

$$\gamma_I = \left[1 - \frac{\omega_2}{\omega_1 k_H} - \frac{I_0 \cos(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 k_H} \right] 100\%.$$

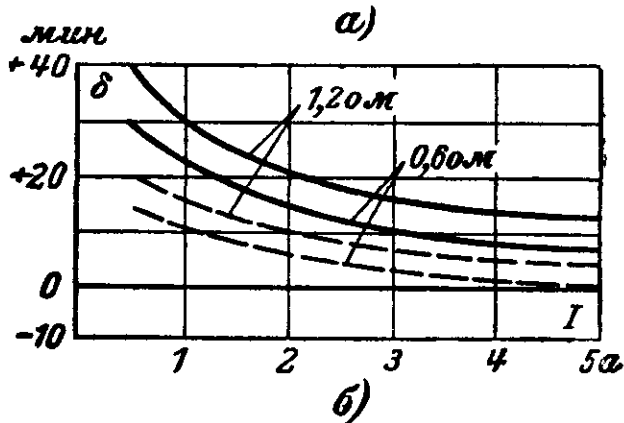
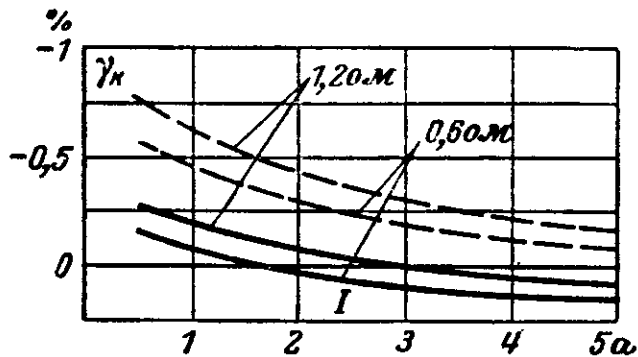


Рис. 7-10. Кривые погрешностей трансформатора тока в зависимости от вторичного тока при различных сопротивлениях вторичной внешней цепи (сплошные кривые при $\cos \varphi = 1$; пунктирные при $\cos \varphi = 0,6$).

a — погрешности в коэффициенте трансформации; b — угловые погрешности.

Величина $1 - \frac{\omega_2}{\omega_1 k_H} = c$ постоянна, поэтому

$$\gamma_I = \left[c - \frac{I_0 \cos(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 k_H} \right] 100\%.$$

Приравняв во внимание, что $\psi_0 = 90^\circ$, получим приближенное выражение погрешности по току:

$$\gamma_I = \left[c - \frac{I_0 \sin \phi_2}{I_2 k_H} \right] 100\%. \quad (7-10)$$

Из векторной диаграммы трансформатора можно написать выражение для тангенса угла δ , а так как этот угол мал, то и для самого угла.

$$\operatorname{tg} \delta = \delta = \frac{I_0 \omega_1 \sin(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 \omega_2 + I_0 \omega_1 \cos(\psi_0 - \psi_2)}.$$

Приняв во внимание, что величина $I_0 \omega_1 \cos(\psi_0 - \psi_2)$ мала по сравнению с $I_2 \omega_2$, получим:

$$\delta \approx \frac{I_0 \omega_1 \sin(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 \omega_2} = \frac{I_0 \sin(\psi_0 - \psi_2)}{I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}}.$$

Так как $\psi_0 \approx 90^\circ$, то приближенное выражение угловой погрешности примет вид:

$$\delta_0 = \frac{I_0 \cos \psi_2}{I_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}}. \quad (7-11)$$

Выведенная формула показывает, что угловая погрешность трансформатора тока зависит от тех же величин, что и погрешность по току

Выбрав отношение чисел витков $\omega_2/\omega_1 = k_n$, получим $c=0$: тогда погрешность по току, как следует из рис. 7-10, будет отрицательной

при всех значениях тока I_2 . Обычно выбирают отношение $\frac{\omega_2}{\omega_1} < k_n$

таким, чтобы при некотором значении тока I'_2 погрешность была равна нулю. Тогда при больших токах погрешность будет положительной, а при меньших—отрицательной.

Так как погрешности трансформатора тока увеличиваются с увеличением сопротивления вторичной внешней цепи трансформатора, то для каждого трансформатора заводом указывается его номинальное сопротивление — номинальная вторичная нагрузка в омах или номинальная мощность в вольт-амперах.

Номинальной вторичной нагрузкой трансформатора тока называется то наибольшее сопротивление, на которое можно замыкать его вторичную обмотку без увеличения погрешности выше допустимой для соответствующего класса точности.

Номинальная нагрузка и номинальная полная мощность вторичной цепи трансформатора тока связаны между собой соотношением

$$S_n = I_{n2}^2 z_n.$$

Вторичный номинальный ток у большинства трансформаторов тока равен 5 а.

Количество измерительных приборов, которые могут быть присоединены к трансформатору тока, легко определить, если известны номинальная нагрузка трансформатора и сопротивления приборов.

В табл. 3-4 даны мощности потерь приборов, по которым легко найти среднее значение сопротивлений приборов.

Пример 7-2. Проверить, возможно ли подключение к трансформатору тока с номинальным сопротивлением 0,6 ом электромагнитного амперметра и индукционного ваттметра, если соединительные медные провода имеют длину 20 м и сечение 4 мм².

Сопротивление соединительных проводов

$$r_{с пр} = \rho \frac{l}{S} = 0,0175 \frac{20}{4} = 0,09 \text{ ом};$$

сопротивление амперметра (из таблицы) 0,1 ом;

сопротивление ваттметра (из таблицы) 0,2 ом.

Полное сопротивление вторичной внешней цепи трансформатора тока определяется геометрической суммой полных сопротивлений последовательных обмоток присоединенных приборов и соединительных проводов, однако для приближенных подсчетов эти сопротивления можно складывать арифметически.

Таким образом, сопротивление вторичной внешней цепи равно:

$$0,09 + 0,1 + 0,2 = 0,39 \text{ ом}$$

Такая нагрузка для данного трансформатора допустима.

Из кривых на рис. 7-10 видно, что при неизменной нагрузке z_2 и уменьшении измеряемого тока погрешности трансформатора увеличиваются. Это происходит вследствие относительного увеличения намагничивающего тока.

Для получения трансформаторов с меньшими погрешностями необходимо или применять для сердечников дорогостоящие специальные стали с высокой магнитной проницаемостью, или увеличивать сечение сердечника, что приводит к увеличению веса, размера и стоимости трансформатора, или, наконец, можно применять специальные схемы и конструкции трансформатора тока, дающие возможность компенсировать погрешности — компенсированные трансформаторы тока.

Одна из таких часто применяемых схем основана на искусственном подмагничивании сердечника до величи-

ны, при которой материал сердечника обладает наибольшей магнитной проницаемостью. Это приводит к относительному уменьшению результирующей н. с. $I_0\omega_1$, а следовательно, к уменьшению погрешностей. Подмагничивание производится вторичным током при прохождении его по дополнительным обмоткам ω'_2 и ω''_2 (рис. 7-11).

Вторая, часто применяемая схема компенсированного трансформатора тока основана на подмагничивании сердечника полем рассеяния до величины, при которой материал сердечника обладает наибольшей магнитной проницаемостью.

В этом случае применяют магнитопровод с магнитным шунтом (рис. 7-12). Магнитный шунт уменьшает

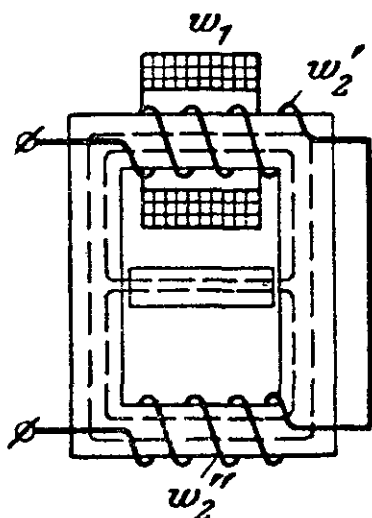


Рис. 7-12. Схема компенсированного трансформатора тока с магнитным шунтом.

Киевского завода.

Этот трансформатор состоит из кольцевого сердечника, выполненного из пермаллоя, и двух обмоток. Вторичная обмотка (зажимы I_1 , I_2) рассчитана на номинальный ток $I_{H2}=5$ а. Первичная обмотка состоит из двух

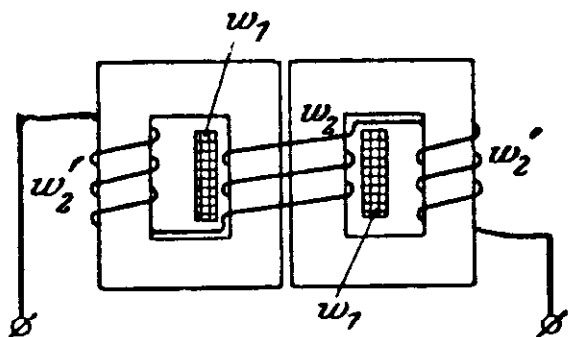


Рис. 7-11. Схема компенсированного трансформатора тока с дополнительными обмотками.

магнитное сопротивление пути потоков рассеяния, что влечет за собой увеличение потоков рассеяния и подмагничивание ими сердечника трансформатора.

На рис. 7-13 дан внешний вид трансформатора тока катушечного типа с фарфоровой изоляцией типа ТКФ.

На рис. 7-14 дан внешний вид компенсированного трансформатора тока типа 0-49У. С левой стороны хорошо виден магнитный шунт в виде скобы, охватывающий первичную обмотку.

На рис. 7-15 даны схема и внешний вид универсального трансформатора тока типа УТТ-5

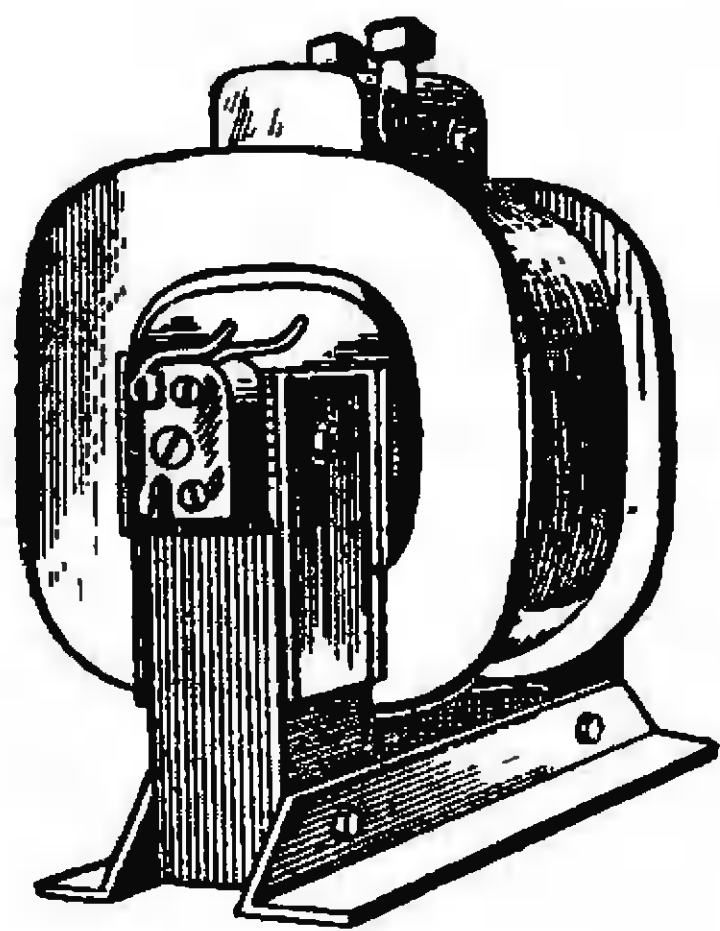


Рис. 7-13. Внешний вид трансформатора тока катушечного типа с фарфоровой изоляцией типа ТКФ.

частей соответственно двум значениям первичного номинального тока $I_{н1}=15\text{ а}$ и $I_{н1}=50\text{ а}$. При больших значениях измеряемого тока (до 600 а) поверх кожуха накладывается внешняя первичная обмотка из гибкого провода, витки которой проходят через отверстие в трансформаторе. Число витков этой обмотки для различных значений номинального тока указано на щитке трансформатора. Класс точности трансформатора 0,2.

Трансформатор тока включается последовательно с приемником энергии (в рассечку главного провода), поэтому при коротком замыкании в цепи ток короткого замыкания будет проходить через первичную обмотку. При больших токах короткого замыкания и недостаточно надежной конструкции трансформатора могут иметь место механические и термические повреждения или разрушения трансформатора.

Механические повреждения измерительных трансформаторов тока получаются вследствие электродинамического взаимодействия между проводами с током.

Устойчивость трансформатора тока к токам короткого замыкания оценивается его термической и динамической устойчивостью.

Термической устойчивостью трансформатора тока называют отношение действующего значения тока, который трансформатор может выдержать в течение 1 сек без какого бы то ни было изменения

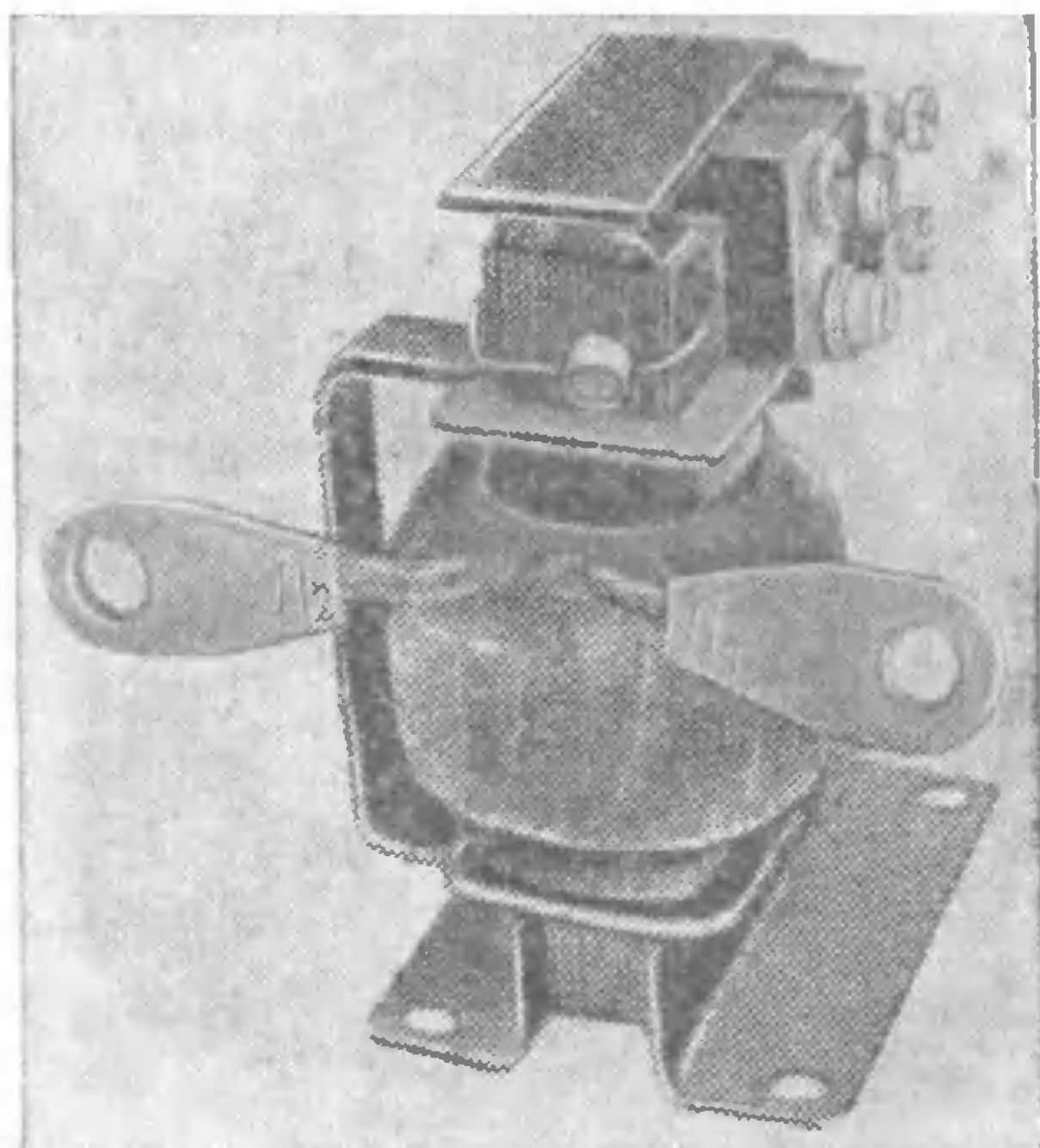
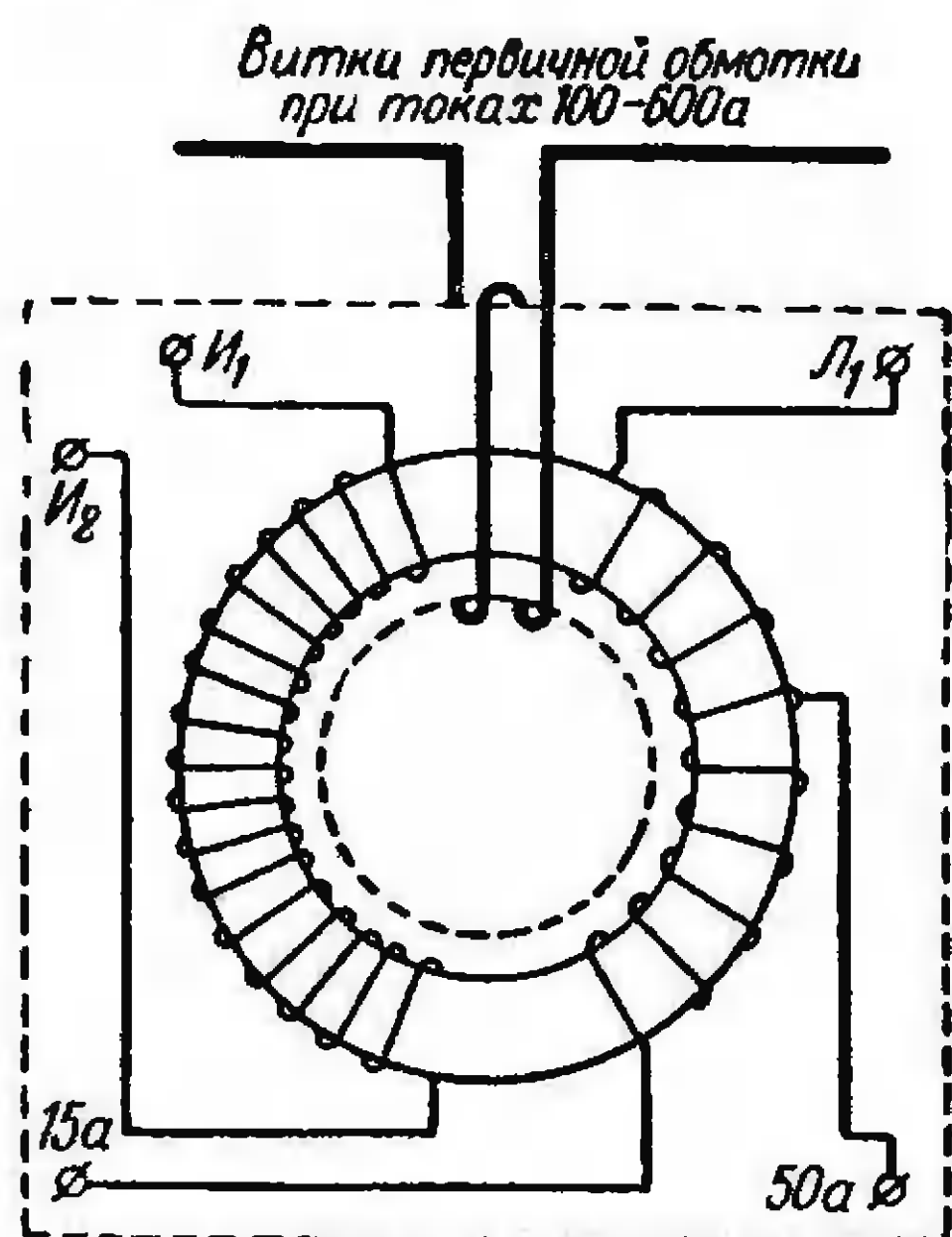


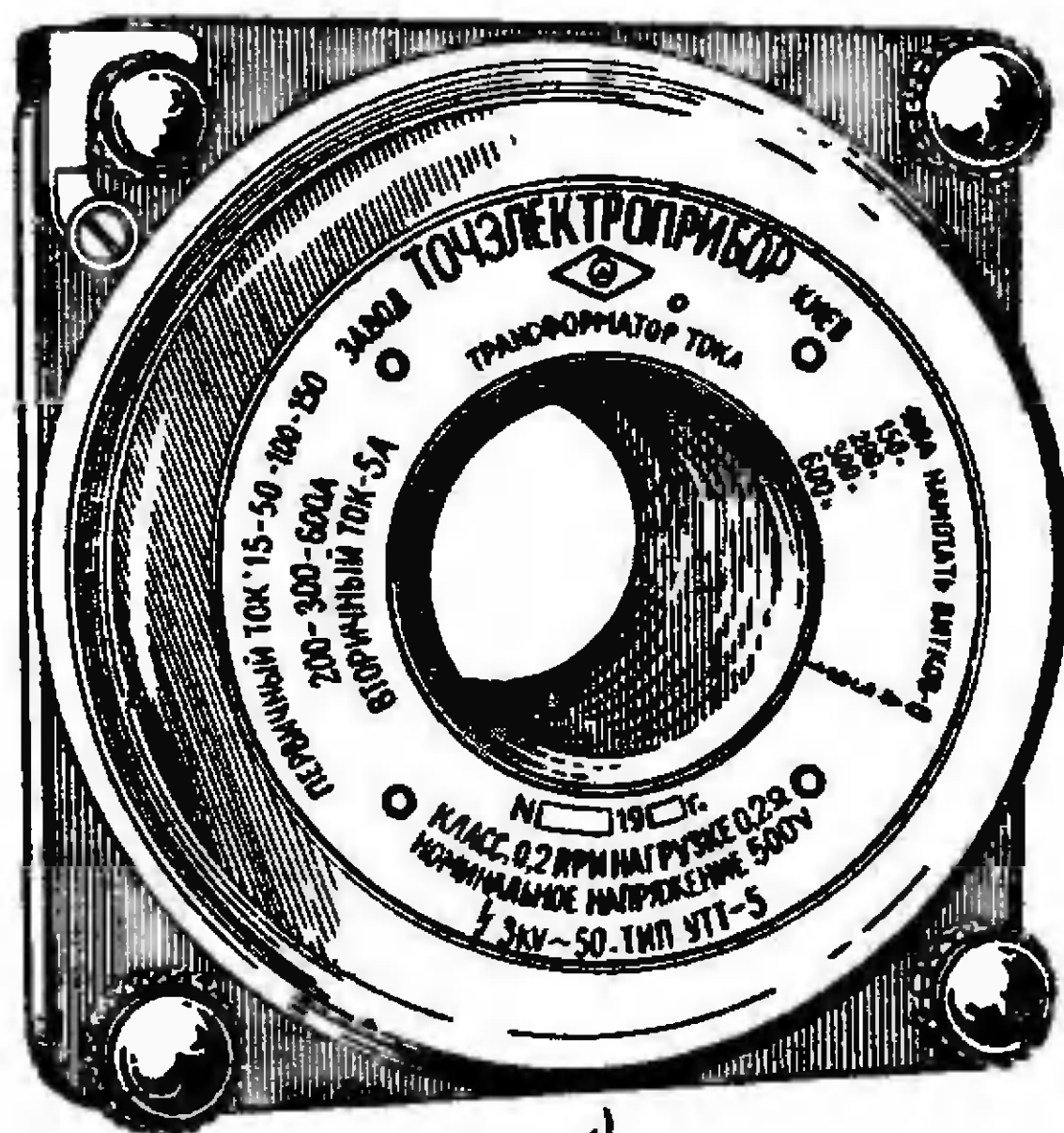
Рис. 7-14. Трансформатор тока типа 0-49У.

своих свойств к действующему значению номинального тока трансформатора.

Динамической устойчивостью называют отношение амплитуды тока, которую трансформатор может выдержать без каких бы то ни было изменений своих электрических или механических свойств в продолжение одного



а)



б)

Рис. 7-15. Трансформатор тока типа УТТ-5.

а — схема; б — внешний вид.

полупериода, к амплитуде номинального тока трансформатора.

В установках с большими токами короткого замыкания применяются трансформаторы тока особой конструкции, обладающие достаточной термической и динамической устойчивостью. Одна из таких конструкций дана на рис. 7-16.

Трансформатор тока типа ТПОЛ10 — проходной одновитковый с литой изоляцией на 10 кВ. Как видно из рисунка, он состоит из медного стержня 1 с расплюснутыми концами (первичная обмотка), который охватывается двумя кольцевыми стальными сердечниками 2, на каждый из которых намотана вторичная обмотка 3, имеющая форму спирали. Крепление перечисленных частей между собой и изоляция токоведущих частей выполнены заливкой их эпоксидным компаундом, образующим сплошной изоляционный корпус 4. Литой корпус

является надежной защитой внутренних частей от влаги и механических повреждений.

Трансформатор крепится при помощи металлического фланца 5, надетого на корпус и закрепленного на нем при помощи выступающих из корпуса лапок.

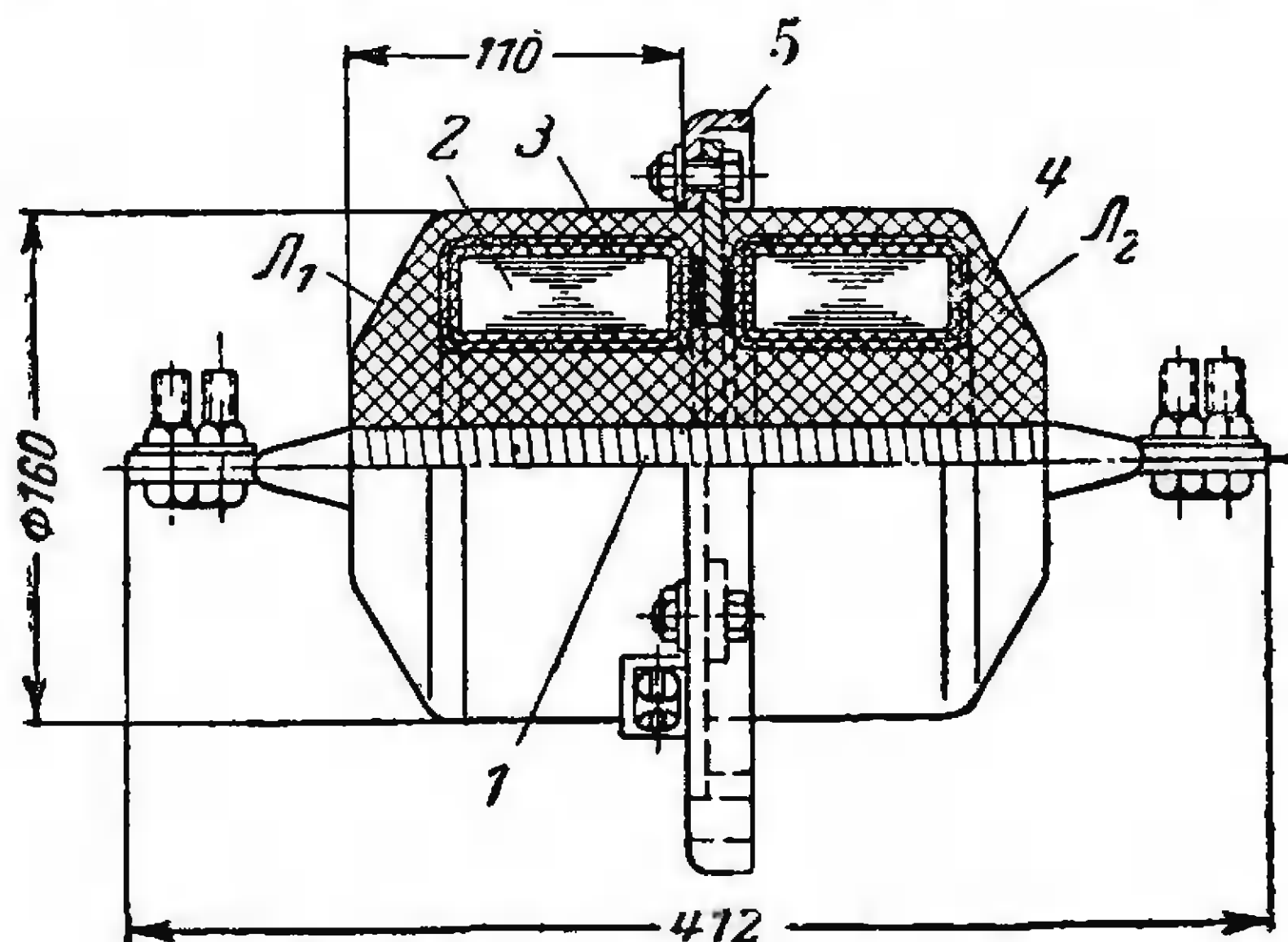


Рис. 7-16. Трансформатор тока типа ТПОЛ10.

На рис. 7-17 показано устройство трансформатора тока проходного типа с фарфоровой изоляцией.

Первичная обмотка 1 состоит из одного или нескольких витков, охватывающих два стальных сердечника 2,

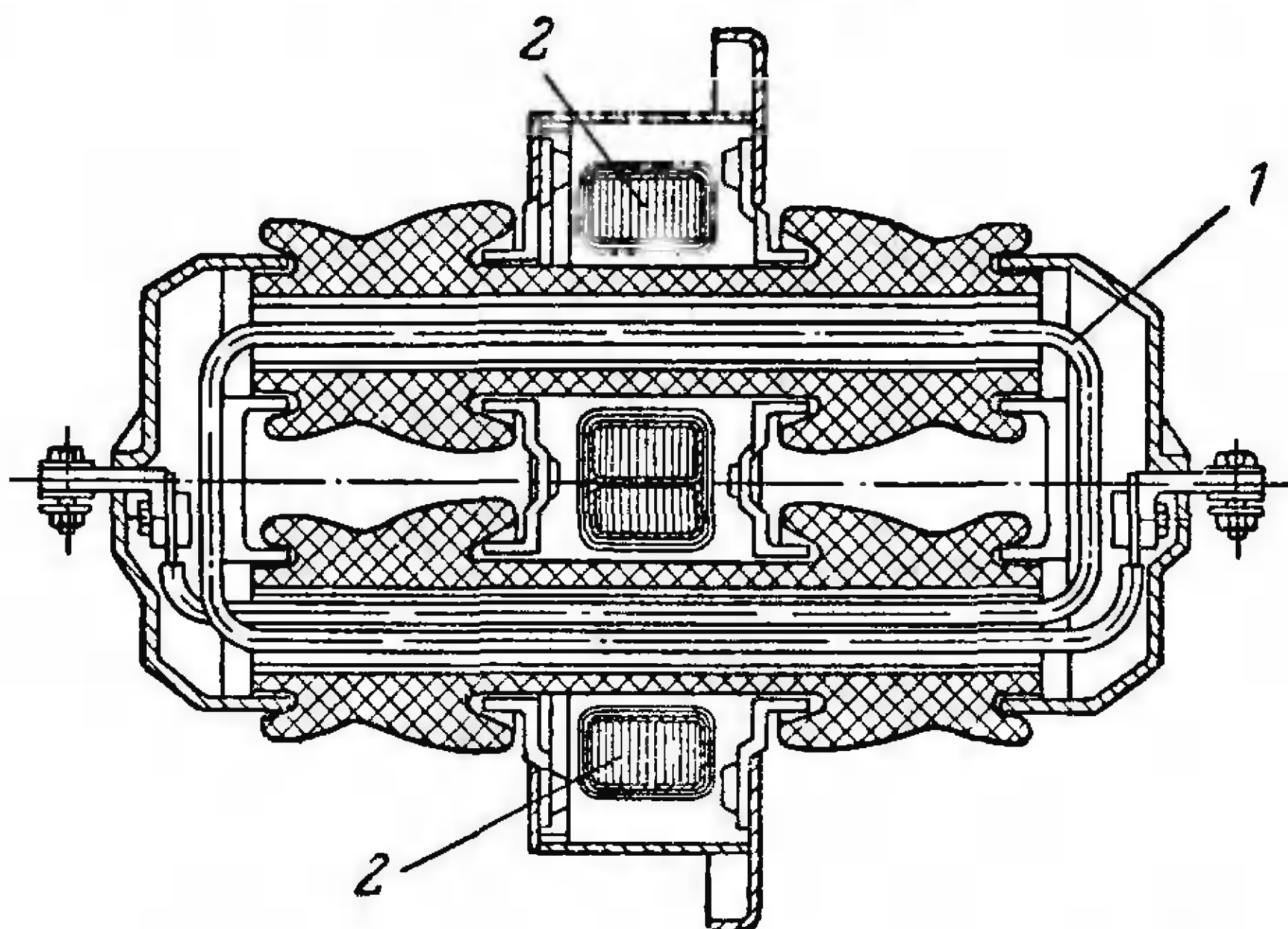


Рис. 7-17. Поперечный разрез трансформатора тока проходного типа с фарфоровой изоляцией (тип ТПФМ-10).

устройство которых показано на рис. 7-11. Трансформатор изготавливается на напряжение до 10 кВ, класс точности 0,5 и ниже.

На рис. 7-18 показаны измерительные клещи — разновидность трансформатора тока с разъемным сердечником.

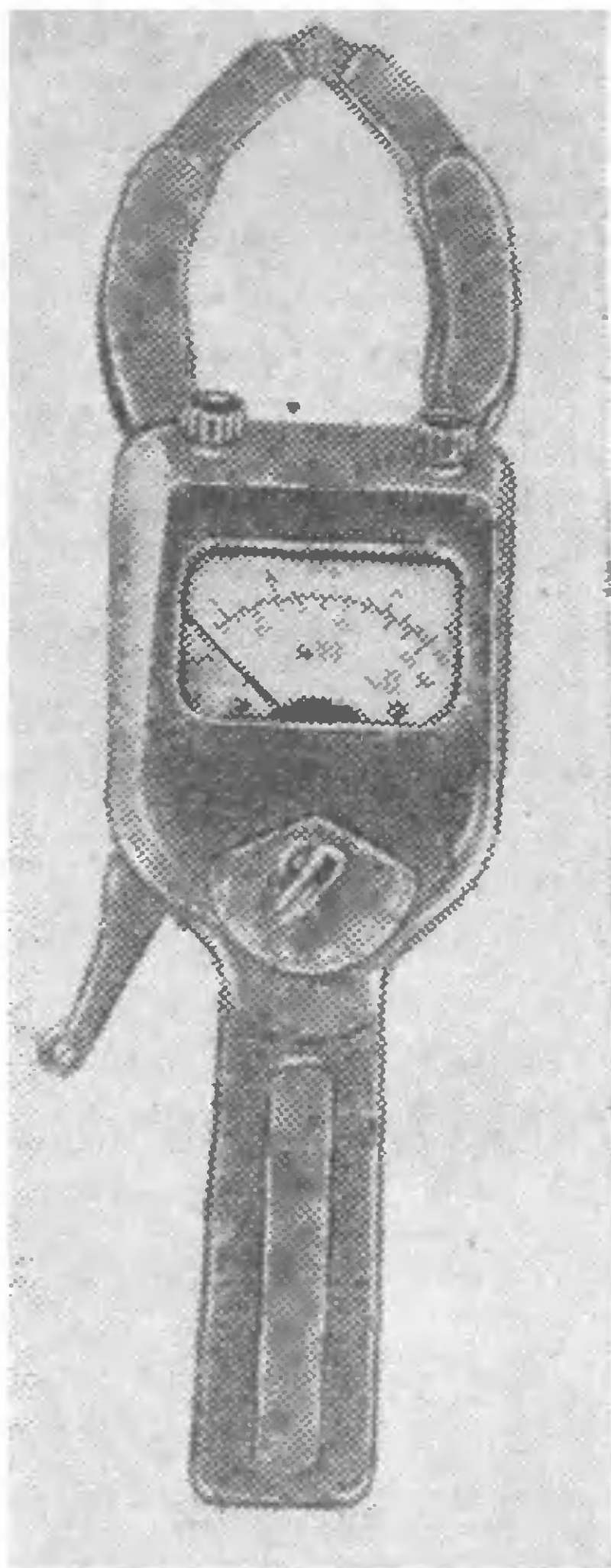


Рис. 7-18. Измерительные клещи типа Ц-30.

изготавливаются на номинальные токи 15—30—75—300 и 600 А. Они могут применяться в цепях с напряжением до 600 В, класс точности их 2,5.

При напряжении порядка 100 кВ и выше применяются каскадные трансформаторы тока, облегчающие получение более надежной изоляции вторичной обмотки от первичной цепи.

На рис. 7-19 дана схема каскадного трансформатора тока, имеющего три элемента; в нем изоляция распреде-

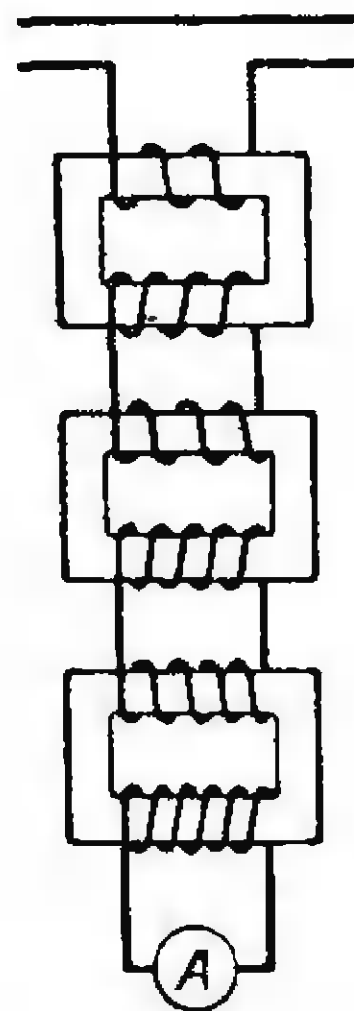


Рис. 7-19. Схема устройства каскадного трансформатора тока.

ником и одной вторичной обмоткой, замкнутой на амперметр выпрямительной системы. Разъемный сердечник дает возможность измерять ток, идущий по какому-либо проводу, не разрывая его, а только охватывая его клещами — сердечником трансформатора. Измерительные клещи типа Ц-30

ляется на три ступени, и, следовательно, выполнение ее является более простым и легким.

С другой стороны, такое устройство требует трехступенчатой передачи мощности от первой цепи к цепи измерительных приборов. Это эквивалентно повышению сопротивления вторичной цепи трансформатора тока, так как вместо сопротивления одной вторичной обмотки здесь имеется пять обмоток, включенных как бы последовательно.

Для уменьшения активного сопротивления этих обмоток их изготавливают из провода относительно большого сечения.

Уменьшение влияния увеличенного реактивного сопротивления трансформатора на его погрешность достигается увеличением сечения сердечников.

Трансформаторы тока делятся:

1. По роду установок:

а) для внутренних установок; б) для наружных установок; в) встроенные трансформаторы тока, устанавливаемые внутри других аппаратов или машин, например выключателей силовых трансформаторов и т. п.

Таблица 7-3

Допустимые погрешности для трансформаторов тока
ГОСТ 7746-55

Класс точности	Величина первичного тока в % от номинального	Предельные значения		Пределы вторичной нагрузки в % от номинальной при $\cos \varphi_2 = 0,8$
		токовой погрешности, %	угловой погрешности, мин	
0,2	10	$\pm 0,5$	± 20	25—100
	20	$\pm 0,35$	± 15	
	100—120	$\pm 0,2$	± 10	
0,5	10	± 1	± 60	25—100
	20	$\pm 0,75$	± 50	
	100—120	$\pm 0,5$	± 40	
1	10	± 2	± 120	25—100
	20	$\pm 1,5$	± 100	
	100—120	± 1	± 80	
3	50—120	± 3	Не нормируется	50—100
10	50—120	± 10	То же	50—100

2. По способу установок:

а) проходные, устанавливаемые в проемах стен или потолков; б) опорные, устанавливаемые на горизонтальной или вертикальной плоскости.

3. По конструкции первичной обмотки:

а) одновитковые — стержневые; б) одновитковые — шинные; в) многовитковые — катушечные; г) многовитковые с петлевой обмоткой; д) многовитковые с обмоткой восьмерочного типа.

4. По роду изоляции:

а) с воздушной изоляцией; б) с фарфоровой изоляцией; в) с литой изоляцией.

5. По степени точности (ГОСТ 7746-55) на пять классов точности (табл. 7-3).

Государственным стандартом (ГОСТ 7746-55) установлены следующие значения номинальных вторичных нагрузок для трансформаторов тока с номинальным вторичным током 5 а — 0,1; 0,15; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,6; 2; 2,4; 3 и 4 ом.

Нижний предел вторичной нагрузки для трансформаторов с номинальной нагрузкой 0,1; 0,15; 0,2 и 0,4 ом установлен соответственно 0,05; 0,1; 0,15 и 0,15 ом.

Тем же стандартом на трансформаторы тока установлены следующие значения номинальных первичных токов: 5; 10; 15; 20; 30; 40; 50; 75; 100; 150; 200; 300; 400; 600; 800 а; 1; 1,5; 2; 3; 4; 5; 6; 8; 10 и 15 ка.

7-4. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Схема трансформатора постоянного тока дана на рис. 7-20.

Трансформатор состоит из двух одинаковых замкнутых сердечников, на каждый из которых наложено по две обмотки. Сердечники изготовлены из пермаллоя.

Измеряемый постоянный ток I_1 проходит по первичным обмоткам, соединенным последовательно. Две вторичные обмотки, соединенные между собой последовательно (или параллельно), через выпрямитель присоединяются к источнику питания с переменным напряжением. Вторичные обмотки соединены так, что в течение первого полупериода переменного тока i_2 вторичная н. с. $i_2\omega_2$ в первом сердечнике имеет встречное направление по отношению к первичной н. с. $I_1\omega_1$, а во втором сердечнике направления первичной и вторичной н. с. совпадают. В течение второго полупериода, наоборот, в первом сердечнике направления н. с. совпадают, а во втором они будут иметь встречные направления.

Идеальная кривая намагничивания сердечника из пермаллоя дана на рис. 7-21,а.

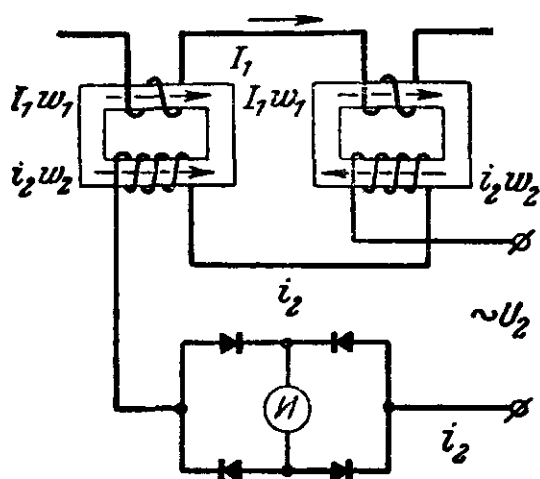


Рис. 7-20. Схема измерительного трансформатора постоянного тока.

При некотором значении измеряемый постоянный ток создает н. с. $F_a = I_1 w_1$, которая намагничивает сердечник до состояния насыщения, определяемого значением индукции B_a (рис. 7-21, а).

Отметим, что активное сопротивление вторичных обмоток и магнитные потоки рассеяния этих обмоток малы и ими в первом приближении можно пренебречь.

Подключим вторичную цепь к синусоидальному напряжению с постоянным действующим значением.

Ток в этой цепи

$$i_2 = \frac{u_2 - w_2 \frac{d\Phi}{dt}}{r_2}.$$

Так как из-за насыщения сердечника магнитный поток изменяться не может ($d\Phi/dt=0$), а сопротивление цепи практически равно нулю ($r_0=0$), то ток в цепи будет увеличиваться до значения

$$i_2 = \frac{I_1 w_1}{w_2}.$$

При этом значении тока алгебраическая сумма первичной и вторичной н. с. будет равна нулю. Сердечник выйдет из состояния на-

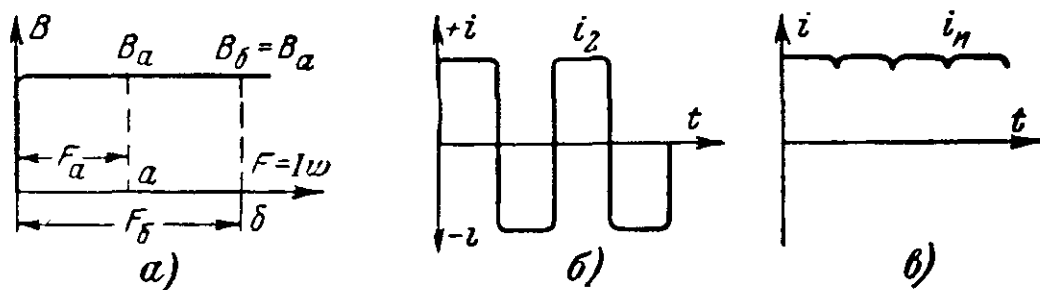


Рис. 7-21. Характеристики трансформатора тока.

а — кривая намагничивания; б — кривая тока во вторичной цепи; в — кривая тока в измерителе.

сыщения, магнитный поток его будет изменяться, наводя во вторичной цепи э. д. с. $e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}$, уравновешивающую напряжение u_2 , и рост тока i_2 прекратится.

В течение первого полупериода н. с., действующая во втором сердечнике, изменяется от значения $F_a = I_1 w_1$ до значения $F_\delta = F_a + i_2 w_2 = 2F_a$, и в соответствии с этим магнитная индукция и магнитный поток в этом сердечнике остаются без изменения. Таким образом, в течение первого полупериода вторичная обмотка второго сердечника не оказывает влияния на величину тока i_2 .

В течение второго полупериода явления повторяются с той лишь разницей, что вторичные обмотки первого и второго сердечников меняются ролями.

Таким образом, при наличии постоянного измеряемого тока I_1 в первичной цепи трансформатора тока во вторичной цепи будет проходить переменный ток с прямоугольной формой кривой (рис. 7-21,б), а в диагонали мостовой выпрямительной схемы, в которую включен измерительный механизм, будет проходить постоянный ток $i_2 = i_n$ (рис. 7-21,в).

Изменение величины измеряемого тока I_1 вызовет изменение первичной н. с. $F = I_1 \omega_1$. При этом ток во вторичной цепи также изменит величину до того значения, при котором н. с. первичной и вторичной цепи будут одинаковы:

$$i_2 \omega_2 = I_1 \omega_1.$$

Из написанного следует, что

$$I_1 = i_2 \frac{\omega_2}{\omega_1} = k I_2.$$

Измеряя вторичный ток и умножая его на действительный коэффициент трансформации, получим действительное значение первичного тока.

Вследствие того, что кривая намагничивания ферромагнитных материалов отличается от идеальной, а также из-за потоков рассеяния и активного сопротивления вторичной цепи трансформатора возникают погрешности в коэффициенте трансформации.

Значение первичного тока обычно находится по формуле

$$I'_1 = k_n I_2,$$

где $k_n = \frac{I_{n1}}{I_{n2}}$ — номинальный коэффициент трансформации, даваемый заводом.

На рис. 7-22 дана схема измерительного трансформатора постоянного напряжения.

Первичные обмотки трансформатора, соединенные последовательно с добавочным сопротивлением, подключены к измеряемому напряжению. Вторичные обмотки, соединенные параллельно, через выпрямитель присоединяются к источнику питания с переменным напряжением. В диагонали выпрямительной схемы включен измерительный механизм.

Для трансформатора напряжения, так же как и для трансформатора тока, можно написать: $I_1 = k I_2$, но так как

$$I_1 = \frac{U_1}{r_d + r_1},$$

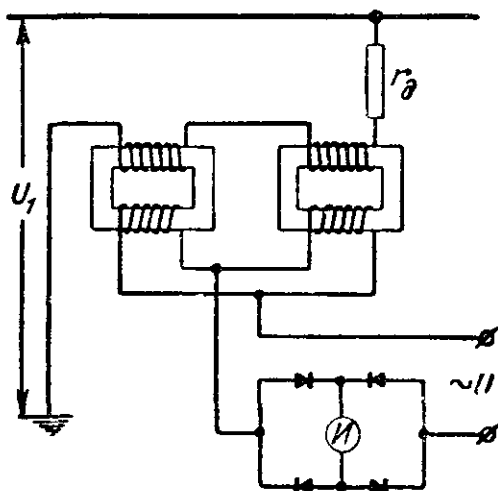


Рис. 7-22. Схема измерительного трансформатора постоянного напряжения.

где $r_d + r_1$ — практически постоянное сопротивление первичной цепи, то

$$U_1 \frac{1}{r_d + r_1} = k I_2$$

или

$$U_1 = k (r_d + r_1) I_2 = k' I_2.$$

Таким образом, угол поворота подвижной части измерительного механизма, зависящий от тока в его обмотке, будет зависеть и от напряжения на зажимах первичной цепи трансформатора, и, следовательно, на шкале можно наносить значения этого напряжения.

Глава восьмая

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

8-1. СХЕМА ВКЛЮЧЕНИЯ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

В амперметрах ток, проходящий по прибору, создает вращающий момент, вызывающий отклонение его подвижной части на угол, зависящий от этого тока. По этому

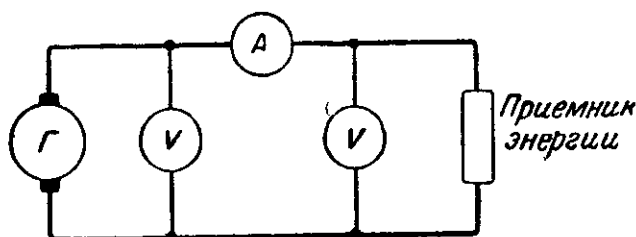


Рис 8-1. Схема включения амперметра и вольтметра

углу отклонения и определяют величину тока амперметра.

Для того, чтобы амперметром измерить ток в каком-то приемнике энергии, необходимо амперметр соединить последовательно с приемником (рис.8-1)

с тем, чтобы ток приемника и амперметра был один и тот же.

Сопротивление амперметра должно быть мало по сравнению с сопротивлением приемника энергии, последовательно с которым он включен, с тем, чтобы его включение практически не влияло на величину тока приемника (на режим работы цепи).

Таким образом, сопротивление амперметра должно быть малым и тем меньшим, чем больше его номинальный ток.

Например, при номинальном токе 5 а сопротивление амперметра составляет $r_A = (0,008—0,4)$ ом. При малом сопротивлении амперметра мала и мощность потерь в нем.

При номинальном токе амперметра 5 а мощность потерь

$$P_A = I_A^2 r_A = (0,2 \div 10) \text{ ватт}.$$

Напряжение, приложенное к зажимам вольтметра, вызывает в его цепи ток. При постоянном сопротивлении ток зависит только от напряжения, т. е.

$$I_V = F(U_V).$$

Этот ток, проходя по вольтметру, так же как и в амперметре, вызывает отклонение его подвижной части на угол, зависящий от тока

$$\alpha = \varphi(I_V).$$

Таким образом, каждому значению напряжения на зажимах вольтметра будут соответствовать вполне определенные значения тока и угла поворота подвижной части:

$$\alpha = \varphi(I_V) = \varphi[F(U_V)] = f(U_V).$$

Следовательно, по углу отклонения подвижной части вольтметра можно определить напряжения на его зажимах.

Для того чтобы по показанию вольтметра определить напряжение на зажимах приемника энергии или генератора, необходимо его зажимы соединить с зажимами вольтметра так, чтобы напряжение на приемнике (генераторе) было равно напряжению на вольтметре (рис. 8-1).

Сопротивление вольтметра должно быть большим по сравнению с сопротивлением приемника энергии (или генератора) с тем, чтобы его включение не влияло на измеряемое напряжение (на режим работы цепи).

Пример 8-1. К зажимам цепи с двумя последовательно соединительными приемниками (рис. 8-2), имеющими сопротивления $r_1 = 2000$ ом и $r_2 = 1000$ ом, приложено напряжение $U = 120$ в.

При этом на первом приемнике напряжение $U_1 = 80$ в, а на втором $U_2 = 40$ в.

Если параллельно первому приемнику включить вольтметр с сопротивлением $r_V = 2000$ ом для измерения напряжения на его зажимах, то напряжение как на первом, так и на втором приемниках будет иметь значение $U'_1 = U'_2 = 60$ в.

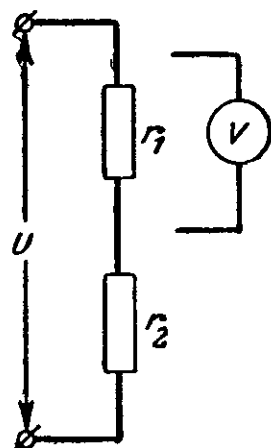


Рис 8-2 Схема включения вольтметра.

Таким образом, включение вольтметра вызвало изменение напряжения на первом приемнике с $U_1=80$ в до $U'_1=60$ в, т. е. погрешность в измерении напряжения, обусловленная включением вольтметра,

$$\gamma_U = \frac{60 \text{ в} - 80 \text{ в}}{80 \text{ в}} 100\% = -25\%.$$

Таким образом, сопротивление вольтметра должно быть большим и тем большим, чем больше его номинальное напряжение. При номинальном напряжении 100 в сопротивление вольтметра $r_v = (2000-50000)$ ом. Вследствие большого сопротивления вольтметра мала мощность потерь в нем $\left(P_v = \frac{U_v^2}{r_v}\right)$.

При номинальном напряжении вольтметра 100 в мощность потерь $P_v = (0,2-5)$ ватт.

Из изложенного следует, что амперметр и вольтметр могут иметь измерительные механизмы одинакового устройства, отличающиеся только своими параметрами. Но амперметр и вольтметр различным образом включаются в измеряемую цепь и имеют разные внутренние (измерительные) схемы.

8.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

Измерение постоянных токов от 1 мка до 6 ка в большинстве случаев производится при помощи приборов магнитоэлектрической системы, представляющих собой измерительные механизмы указанной системы с шунтом.

Измерение постоянных напряжений от 1 мв до 0,6 — 1,5 кв в большинстве случаев также производится при помощи приборов магнитоэлектрической системы, представляющих собой измерительный механизм указанной системы с добавочным сопротивлением.

Эти приборы для измерения токов и напряжений изготавливаются классов точности 0,1—2,5.

При необходимости получить большую точность измерения постоянных токов и напряжений применяют компенсационные методы измерений, обеспечивающие получение точности до $\pm 0,01\%$.

В некоторых случаях при отдельных испытаниях при отсутствии приборов с подходящими номинальными величинами вместо прямого метода непосредственной оцен-

ки можно использовать простейший косвенный метод для измерения тока и напряжения.

Для измерения тока в цепи в нее включают малое образцовое (или известное) сопротивление r_0 (рис. 8-3) и, измеряя напряжение на этом сопротивлении при помощи милливольтметра, определяют искомый ток по формуле

$$I = \frac{U}{\frac{r_0 r_v}{r_0 + r_v}}.$$

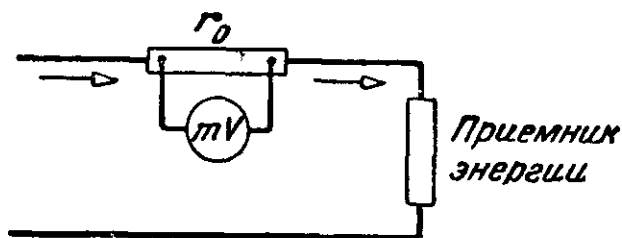


Рис 8-3 Схема для измерения тока милливольтметром.

Если r_v значительно больше r_0 , то можно пользоваться упрощенной формулой

$$I = \frac{U}{r_0}.$$

Последней формулой можно пользоваться и в том случае, если напряжение на сопротивлении r_0 измеряется компенсатором.

Для измерения напряжения между какими-либо точками электрической цепи к этим точкам присоединяют последовательно образцовое (или известное) сопротивление r_0 достаточно большой величины и миллиамперметр. Искомое напряжение находят по формуле

$$U = I_A (r_0 + r_A).$$

8-3. ИЗМЕРЕНИЕ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ

В цепях переменного тока низкого напряжения (до 500 в) технической частоты (50 гц) измерение небольших и средних токов (10^{-2} — $2 \cdot 10^2$) а и напряжений (10^{-2} — $5 \cdot 10^2$) в производится приборами непосредственной оценки различных систем, рассмотренных в гл. 5. Выбор той или иной системы, с одной стороны, определяется предельным значением измеряемой величины, условиями измерений, точностью, с другой стороны, — свойствами приборов данной системы.

При технических измерениях, не требующих большой точности, наиболее распространенными являются приборы электромагнитной системы (класс точности 1,5—2,5).

При измерениях, требующих большей точности, применяют приборы электродинамической системы (классы точности 0,1; 0,2 и 0,5) или электромагнитной системы (класс точности 0,2).

В тех случаях измерения напряжения, когда от вольтметра требуется малая мощность потерь (большое входное сопротивление), применяются вольтметры электростатической, электронной или выпрямительной системы.

В цепях переменного тока низкого напряжения измерение токов большой и средней величин производится амперметрами, включаемыми через измерительные трансформаторы тока.

Для непрерывной записи токов и напряжений в цепях технической частоты применяются регистрирующие приборы ферродинамической системы (класс 1,5—2,5).

8-4. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

При измерении токов и напряжений в цепях трехфазного тока в большинстве случаев удовлетворяются измерением одного из линейных токов и одного из линейных напряжений. В этом случае измерения производятся так же, как и в цепях однофазного тока. В цепях низкого

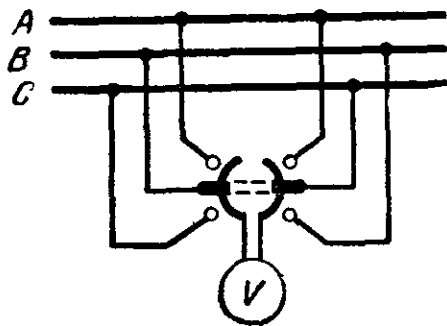


Рис. 8-4. Схема включения вольтметра с переключателем.

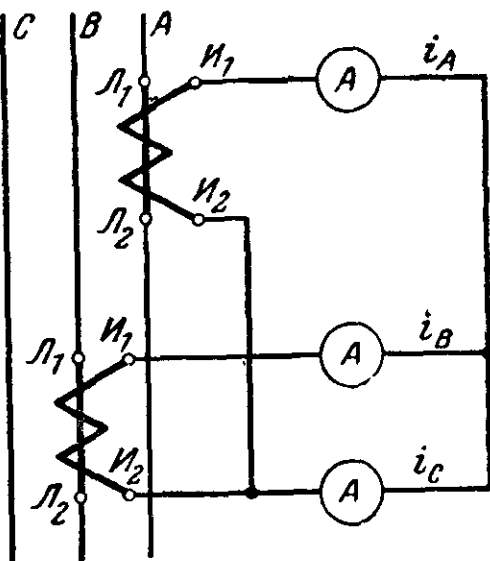


Рис. 8-5. Схема соединения трех амперметров через два трансформатора тока.

напряжения для измерения трех линейных напряжений иногда применяют один вольтметр с переключателем (рис. 8-4).

Если необходимо измерить три линейных тока в трехпроводной трехфазной цепи с применением трансформа-

торов тока, то для измерения трех токов достаточно двух трансформаторов тока. Это непосредственно вытекает из свойства суммы линейных токов, согласно которому сумма трех линейных токов равна нулю:

$$i_A + i_B + i_C = 0$$

и, следовательно, сумма двух линейных токов равна третьему линейному току, взятому с обратным знаком.

Одна из возможных схем включения дана на рис. 8-5. Как видно из схемы, через первый амперметр проходит ток i_A , через второй — i_B , следовательно, ток в третьем амперметре, равный сумме двух линейных токов i_A и i_B , равен третьему линейному току — $i_C = i_A + i_B$.

Если необходимо измерить три линейных напряжения трехфазной трехпроводной цепи с применением трансформаторов напряжения, то для измерения достаточно двух трансформаторов напряжения, что непосредственно вытекает из свойств суммы линейных напряжений. Сумма трех линейных напряжений равна нулю:

$$u_{AB} + u_{BC} + u_{CA} = 0,$$

следовательно, сумма двух линейных напряжений равна третьему линейному напряжению, взятому с обратным знаком.

Одна из возможных схем включения трех вольтметров через два трансформатора напряжения для измерения трех линейных напряжений дана на рис. 8-6.

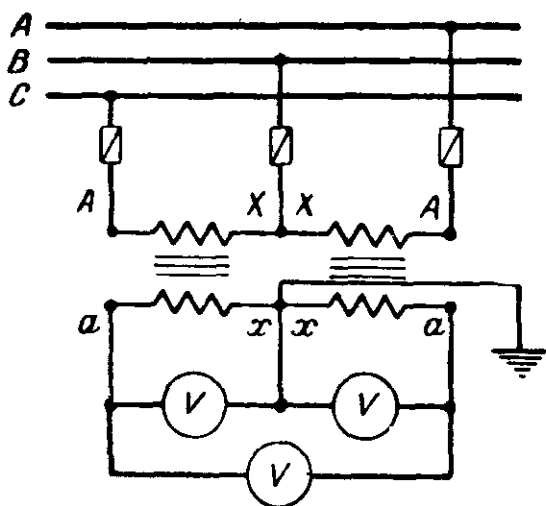


Рис. 8-6. Схема соединения трех вольтметров через два трансформатора напряжения.

8-5. ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

В практике электрических измерений сравнительно часто встречается необходимость измерений малых токов и напряжений.

Для количественного измерения малых токов и напряжений применяются гальванометры и гальванометрические усилители, рассмотренные в гл. 5.

Гальванометрами постоянного тока можно измерять токи не менее $1 \cdot 10^{-9} \text{ а}$ и напряжения не менее $1 \cdot 10^{-6} \text{ в}$.

Дальнейшее повышение чувствительности к току у гальванометра связано с уменьшением противодействующего момента и, следовательно, с уменьшением сечения подвеса, что неизбежно ведет к большим влияниям на работу гальванометра механических сотрясений и колебаний. Если гальванометр применяется для измерения напряжения, то его чувствительность к напряжению снижается вследствие включения последовательно с гальванометром добавочного сопротивления.

В сравнении с гальванометрами гальванометрические усилители (см. § 5-2, ж) имеют большую чувствительность и большую точность. Шкала и тех и других приборов является линейной.

Применяются также гальванометры и специальные приборы, предназначенные для указания отсутствия токов и напряжений или наличия тока или напряжения. Такие приборы называются нулевыми индикаторами. К нулевым индикаторам предъявляются более простые требования, чем к измерителям тока и напряжения — шкала их может быть и не линейной. В качестве нуль-индикаторов применяются гальванометры постоянного и переменного тока (см. гл. 5), ламповые, фотоэлектрические усилители с выходным прибором магнитоэлектрической системы и электронные нуль-индикаторы с электронно-лучевой трубкой (см. гл. 15) или с электронно-лучевой лампой («магический глаз»).

Нуль-индикаторы применяются в мостовых и компенсационных схемах. Ценно то, что их можно применять при повышенных и высоких частотах, тогда как вибрационные гальванометры имеют очень узкий диапазон частот. Так, осциллографический индикатор нуля типа ИНО-ЗМ обеспечивает работу с мостами при частоте 50, 100, 400, 800 и 1 000 гц.

На рис. 8-7 дана схема индикатора нуля с электронно-лучевой трубкой. Нуль-индикатор предназначен для регистрации равновесия моста, т. е. для указания наличия напряжения разбаланса моста — U_y . Это измеряе-

мое напряжение подается на вход усилителя U_1 и далее через фильтр Φ , пропускающий лишь узкий спектр частот (например, в зоне 800 гц), подается на вертикально отклоняющие пластины трубки. На горизонтально отклоняющие пластины подается напряжение от источ-

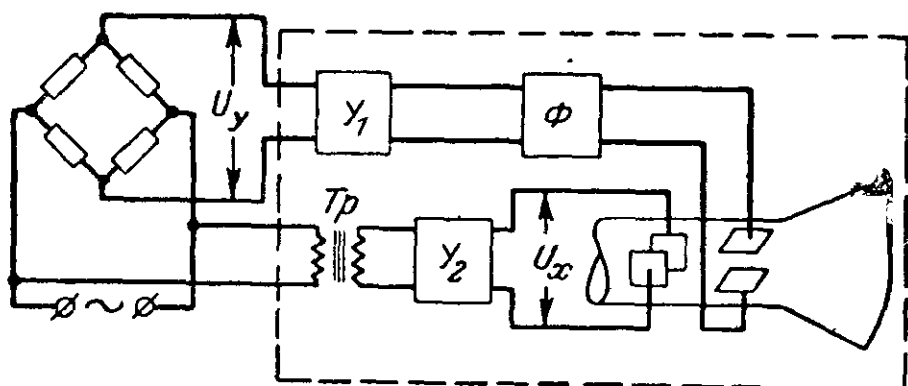


Рис. 8-7. Схема индикатора нуля с электронно-лучевой трубкой.

ника питания через разделительный трансформатор Tr и усилитель U_2 . Фильтр настраивается на одну из частот питаемого напряжения и обеспечивает при этом наибольшую чувствительность и хорошие условия для уравнивания моста.

При равновесии моста (условия равновесия см. § 10-7) на экране электронно-лучевой трубки будет видна лишь горизонтальная линия, так как $U_y = 0$, и вертикального отклонения луча не будет. Если равновесия моста нет, то при одновременном действии напряжений U_x и U_y на систему отклоняющих

пластин трубки электронный луч опишет на экране либо эллипс, либо прямую линию. Наклон эллипса или линии определяется знаком фазы напряжений U_x и U_y .

Нуль-индикатор с ламповым усилителем и «магическим глазом» представляет собой электронную схему,

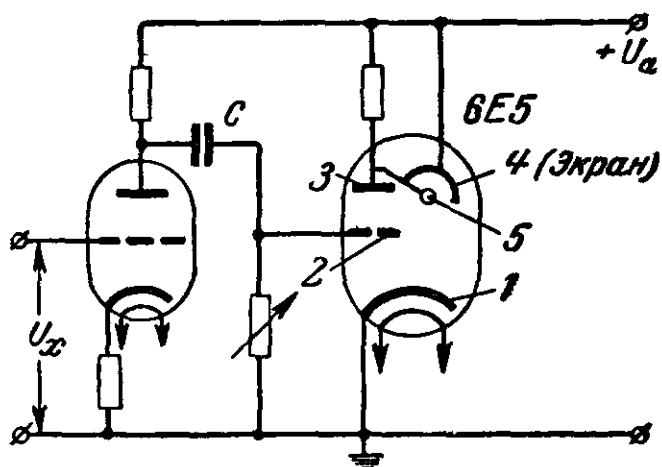


Рис. 8-8. Принципиальная схема индикатора нуля с лампой 6Е5 («магический глаз»).

в которой измеряемое напряжение U_x подается на вход усилителя (рис. 8-8). Усиленный сигнал подается на сетку второй лампы 6Е5С («магический глаз»). Лампа 6Е5С представляет собой сочетание триода с электронно-лучевым индикатором. Она имеет общий катод — 1 и два анода 3 и 4; анод 3 соединен с электродом 5, управляющим лучом. Электроны, ударяясь об анод 4, вызывают его свечение. Электрод 5 отклоняет электроны, что приводит к образованию темного сектора на экране (анод 4). Величина сектора (раствор) зависит от потенциала управляющего электрода 5. При изменении U_x изменяются сигнал, подаваемый на сетку 2, и напряжение на аноде 3 лампы. Таким образом, меняется потенциал управляющего электрода 5. При отсутствии U_x затемненный сектор экрана минимальный.

8-6. ИЗМЕРЕНИЕ БОЛЬШИХ ТОКОВ И ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

В § 8-2 уже отмечалось, что измерение постоянных токов до 6 000 а обычно производится при помощи приборов магнитоэлектрической системы с шунтами.

Шунты на большие токи становятся громоздкими, тяжелыми и дорогими, так, например, шунт типа 75ШС 6 000 а весит 24 кг. Кроме того, применение шунтов на большие токи не обеспечивает достаточной точности и мощность потерь в них велика, например, в упомянутом шунте при номинальном напряжении 75 мв мощность потерь $6\,000\text{ а} \times 0,075\text{ в} = 450\text{ вт}$. Поэтому для измерения больших постоянных токов применяются трансформаторы постоянного тока (см. § 7-4), которые изготавливаются на номинальные первичные токи от 7,5 до 70 ка при вторичном токе 5 а.

Измерение больших переменных токов, как правило, производится амперметрами электромагнитной, ферродинамической, электродинамической систем, включаемых через измерительные трансформаторы тока, которые изготавливаются на номинальные первичные токи до 25 ка.

Применяющееся в некоторых случаях включение амперметров непосредственно в рассечку проводов или шин (без трансформаторов тока) при напряжениях в цепи выше 500 в должно быть выполнено так, чтобы обес-

печивались безопасностью обслуживания и удобство наблюдения за показаниями прибора. Амперметры в таких случаях часто изолируются от земли путем установки их на изоляторах.

В цепях высокого напряжения независимо от рода тока и частоты надо стремиться включать амперметр в участок цепи с потенциалом, равным или близким к потенциалу земли, потому что в противном случае создается опасность для экспериментатора и обслуживающего персонала, могут возникать дополнительные погрешности от электрического поля, создаются неблагоприятные условия для работы изоляции прибора, которая в этом случае должна находиться в соответствии с рабочим напряжением измеряемой цепи.

В высоковольтных цепях постоянного тока напряжение можно измерять: 1) вольтметрами магнитоэлектрической системы, которые изготавливаются на номинальные напряжения до 6 кВ; 2) вольтметрами электростатической системы, которые изготавливаются на номинальные напряжения до 100 кВ; 3) применяя измерительные трансформаторы напряжения постоянного тока.

В цепях высокого напряжения переменного тока измерение напряжения, как правило, производится вольтметрами с номинальным напряжением 100 В, включаемыми через измерительные трансформаторы напряжения. В этом случае, с одной стороны, отпадают трудности изготовления приборов непосредственно на высокое напряжение, с другой — устраняется опасность для обслуживающего персонала при работе с измерительными приборами, присоединенными непосредственно к проводам высокого напряжения.

В высоковольтной технике для измерения высоких напряжений часто пользуются специальными электростатическими вольтметрами, шаровыми разрядниками, клидонографами, электронными осциллографами. Два последних из указанных приборов применяются преимущественно для измерения импульсов напряжения. Перечисленные приборы относятся к специальной области измерительной техники, которая не входит в программу данной книги.

8-7. АМПЕРМЕТРЫ И ВОЛЬТМЕТРЫ В ЦЕПЯХ С НЕСИНУСОИДАЛЬНЫМИ ТОКАМИ И НАПРЯЖЕНИЯМИ

Как известно из теоретической электротехники, при определении синусоидального тока и напряжения мы пользуемся понятиями:

1) действующего или эффективного значения, которое определяется выражениями

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad \text{и} \quad U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt};$$

2) амплитудного или максимального значения I_m и U_m — наибольшими из мгновенных значений за период;

3) среднего за полупериод

$$I_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i dt \quad \text{и} \quad U_{\text{ср}} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} u dt.$$

При синусоидально изменяющейся величине между действующим, амплитудным и средним значениями существуют определенные, известные соотношения, определяемые коэффициентом формы и коэффициентом амплитуды

$$k_f = \frac{U}{U_{\text{ср}}} = 1,11 \quad \text{и} \quad k_a = \frac{U_m}{U} = \sqrt{2} = 1,41.$$

Таким образом, при синусоидально изменяющейся величине напряжения или тока, измерив одну из трех указанных величин, можно определить остальные две. Например, если на зажимах цепи с синусоидальным напряжением вольтметр измерил действующее значение $U = 200$ в, то это означает, что $U_m = 1,41 \cdot 200 = 282$ в, а $U_{\text{ср}} = \frac{1}{1,11} 200 = 0,9 \cdot 200 = 180$ в.

При несинусоидальной кривой картина будет другая. Чем более тупой будет кривая измеряемой величины, чем ближе она будет к прямоугольной форме (рис. 8-9), тем ближе к единице будут k_f и k_a , и наоборот, чем более острой будет кривая измеряемой величины, тем больше будут k_f и k_a по сравнению с соответствующими коэффициентами для синусоиды.

При несинусоидальной кривой вольтметры (амперметры) различных систем будут вести себя по-разному; у вольтметров (амперметров) одних систем (отнесем их к 1-й группе), как вращающий момент, так и угол поворота определяются действующим значением напряжения (тока); у вольтметров (амперметров) других систем (отнесем их ко 2-й группе), как вращающий момент, так и угол поворота определяются средним значением напряжения (тока); наконец, у вольтметров 3-й группы вращающий момент и угол поворота подвижной части определяются амплитудным значением напряжения. При этом необходимо помнить, что на шкалах всех вольтметров (амперметров) наносятся действующие значения напряжения (тока) при синусоидальной форме кривой. Поэтому, если при включении в цепь с несинусоидальным напряжением вольтметр 1-й группы показал, например, напряжение 200 в, то это означает, что $U = 200$ в, U_m и $U_{ср}$ неизвестны; если вольтметр 2-й группы показал 200 в, то это означает, что $U_{ср} = 0,9 \cdot 200 = 180$ в, U и U_m неизвестны; если вольтметр 3-й группы показал 200 в, то это означает, что $U_m = 282$ в, а U и $U_{ср}$ неизвестны.

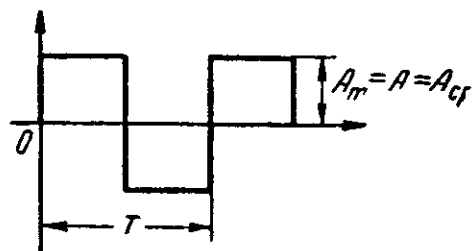


Рис. 8-9. Кривая напряжения прямоугольной формы.

Таким образом, при несинусоидальной измеряемой величине в зависимости от того, какое значение напряжения или тока необходимо определить, следует выбрать прибор соответствующей группы. В противном случае по вине экспериментатора неизбежно будут получены результаты, не соответствующие действительности.

Из изложенного в гл. 4 и 5 следует, что к 1-й группе приборов относятся системы: электромагнитная, электродинамическая, ферродинамическая, электростатическая, тепловая, термоэлектрическая и частично электронная; ко 2-й группе — выпрямительная и частично электронная и, наконец, к 3-й группе относятся амплитудные вольтметры электронной системы.

Магнитоэлектрический прибор. Если включить магнитоэлектрический амперметр в цепь с током

$$i = I_0 + i_1 + i_2 + i_3 + \dots,$$

где I_0 — постоянная составляющая;

i_1, i_2, i_3 — первая, вторая и третья гармоники тока, то мгновенное значение вращающего момента (см. § 4-1)

$$M = BS\omega i = ki,$$

а среднее значение вращающего момента

$$M_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T M dt = \frac{1}{T} \int_0^T ki dt = kI_0. \quad (8-1)$$

Таким образом, если измеряемый ток состоит из постоянной составляющей и ряда синусоид, то как среднее значение вращающего момента, так и угол поворота подвижной части пропорциональны постоянной составляющей тока.

Переменные составляющие тока при прохождении по обмотке нагревают ее, что может быть опасно, кроме того, они создают переменные магнитные поля, оказывающие размагничивающее действие на постоянный магнит.

При включении магнитоэлектрического амперметра в цепь выпрямленного при помощи двухполупериодного выпрямителя несинусоидального тока, состоящего из ряда гармоник, среднее за полупериод значение вращающего момента

$$\begin{aligned} M_{cp} &= \frac{2}{T} \int_0^{T/2} M dt = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} ki dt = \\ &= k [I_{cp1} \cos \psi_1 + I_{cp2} \cos \psi_2 + I_{cp3} \cos \psi_3 + \dots] = \\ &= k \sum_1^n I_{cp} \cos \psi, \end{aligned} \quad (8-2)$$

где $\psi_1, \psi_2, \psi_3, \psi$ — начальные фазы гармоник;

$I_{cp} = \frac{2I_{nm}}{\pi}$ — среднее значение гармоники тока.

Таким образом, как среднее значение вращающего момента, так и угол поворота подвижной части амперметра пропорциональны сумме средних значений всех

гармоник, умноженных на косинусы соответствующих начальных фаз. Иначе говоря, показания амперметра зависят от составляющих тока с учетом их фазы.

Сказанное об амперметре справедливо и по отношению к вольтмеру.

Выпрямительный прибор. Так как выпрямительный прибор представляет собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с двухполупериодным полупроводниковым выпрямителем, то все сказанное о магнитоэлектрическом приборе, включенном в цепь с выпрямленным током, остается справедливым и по отношению к детекторному прибору. Таким образом, показания детекторного прибора определяются суммой средних значений всех гармоник, умноженных на косинусы соответствующих начальных фаз.

Угол поворота подвижной части выпрямительного прибора с двухполупериодным выпрямлением определяется выражением (5-21)

$$\alpha = \frac{BS\omega}{k_{\phi}D} I,$$

где I — действующее значение тока.

Так как шкала прибора градуируется при синусоидальном токе в действующих значениях, то можно написать:

$$\alpha = \frac{BS\omega}{k_{\phi}D} I = \frac{1}{C_I} I,$$

откуда постоянная по току

$$C_I = \frac{k_{\phi}D}{BS\omega} = \frac{1,11D}{BS\omega}. \quad (8-3)$$

При несинусоидальном токе коэффициент формы отличается от коэффициента формы при синусоиде и показания прибора будут неправильны.

Если коэффициент формы измеряемого несинусоидального тока известен или может быть найден, то для него можно найти новую постоянную прибора по току, пользуясь которой можно производить измерение данного несинусоидального тока.

Обозначив коэффициент формы кривой измеряемого несинусоидального тока k'_ϕ , можно написать для этого тока постоянную

$$C'_I = \frac{k'_\phi D}{BS\omega}.$$

Ее можно выразить через известную постоянную для синусоидального тока C_I .

Поделив постоянные, получим:

$$\frac{C'_I}{C_I} = \frac{k'_\phi D}{BS\omega} \cdot \frac{BS\omega}{1,11D} = \frac{k'_\phi}{1,11},$$

откуда постоянная для данного несинусоидального тока

$$C'_I = C_I \frac{k'_\phi}{1,11}.$$

Электронные вольтметры. Как известно, из гл. 5, электронные вольтметры можно разделить на вольтметры с линейной характеристикой, с квадратичной характеристикой и амплитудные вольтметры.

Вольтметры с линейной характеристикой — это диодные вольтметры с однополупериодным выпрямлением (рис. 5-46, а). При компенсации начального тока среднее значение вращающего момента при несинусоидальном измеряемом напряжении будет аналогично выражению (8-2).

$$M_{ср} = k [U_{ср1} \cos \psi_1 + U_{ср2} \cos \psi_2 + \\ + U_{ср3} \cos \psi_3 + \dots].$$

При однополупериодном выпрямлении это выражение применимо для кривой, симметричной относительно оси времени, у которой обе полувольтны одинаковы. Если среднее значение ординат полувольтн неодинаковы, то показание вольтметра будет зависеть от фазы напряжения относительно зажимов вольтметра. В этом случае следует брать среднее арифметическое из двух измерений, при которых меняются местами зажимы вольтметра. Сказанное выше о выпрямительных приборах в отношении измерения несинусоидальных величин остается в силе и для этой разновидности электронных вольтметров.

В электронных вольтметрах с квадратичной характеристикой (рис. 5-47) угол поворота подвижной части магнитоэлектрического измерителя, так же как и вращающий момент, пропорциональны квадрату действующего значения измеряемого напряжения. Это остается справедливым и при несинусоидальной форме кривой, если соответствующим образом выбрана рабочая точка и анодно-сеточная характеристика лампы.

Таким образом,

$$M_{cp} = kU^2 = k(U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots).$$

В таких вольтметрах анодный ток $i_{a,cp}$ (рис. 5-48), измеряемый магнитоэлектрическим измерительным механизмом, обуславливается действием на сетку лампы как положительной, так и отрицательной полуволн измеряемого напряжения U_x . Поэтому показания вольтметра не зависят от фазы U_x по отношению к зажимам вольтметра.

Амплитудные вольтметры (рис. 5-46,б), снабженные специальной надписью на шкале, измеряют 0,707 амплитудного значения несинусоидального напряжения любой формы, симметричной относительно оси времени. Если кривая измеряемого напряжения несимметрична относительно оси времени, то показание амплитудного вольтметра будет зависеть от фазы приложенного напряжения.

Для определения амплитуды измеряемого несинусоидального напряжения любой формы необходимо показание вольтметра умножить $\sqrt{2} = 1,41 = \frac{1}{0,707}$, т. е.

$$U_{mx} = 1,41 U_v.$$

8-8. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ И ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ

Всякий измерительный прибор обладает активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью.

На рис. 8-10,а дана упрощенная эквивалентная схема приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической, термоэлектрической и тепловой систем, и на рис. 8-11,а—схемы приборов электростатиче-

ской, ламповой и детекторной систем. На этих схемах приняты обозначения: 1 и 2 — зажимы приборов; r , L и C — активное сопротивление, индуктивность и емкость измерительного механизма (и элементов измерительной схемы прибора); C_1 и C_2 — емкости входных проводов относительно корпуса прибора — земли (входные емкости); C_{12} — емкость между входными проводами. Эле-

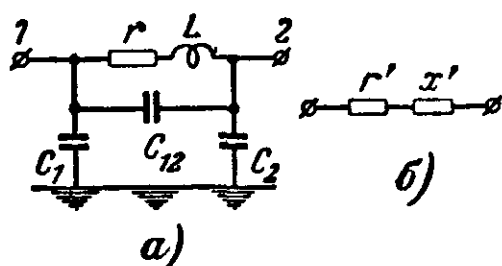


Рис. 8-10. Эквивалентная (а) и упрощенная эквивалентная (б) схема прибора.

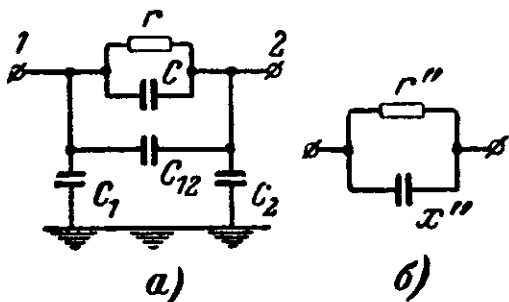


Рис. 8-11. Эквивалентная (а) и упрощенная эквивалентная (б) схема прибора (другая конструкция).

менты схемы имеют различные значения в зависимости от системы и конструкции приборов. Схемы на рис. 8-10,а и 8-11,а можно преобразовать в более простые эквивалентные схемы (рис. 8-10,б и 8-11,б).

Сопротивление прибора при работе его в цепи переменного тока зависит от частоты этой цепи. Активное сопротивление прибора с увеличением частоты увеличивается вследствие поверхностного эффекта; индуктивное сопротивление ($2\pi fL$) с ростом частоты увеличивается, а емкостное сопротивление ($\frac{1}{2\pi fC}$) уменьшается.

Так, например, амперметр электродинамической системы на номинальный ток $I_H = 5$ а имеет индуктивность $L = 25$ мкгн. Его реактивное сопротивление при частоте 50 гц

$$x_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,000025 \approx 0,008 \text{ ом},$$

а при частотах 50 кгц и 5 Мгц соответственно 8 и 800 ом. Понятно, что включение такого амперметра в цепь с частотой выше 5—10 кгц недопустимо, так как его включение значительно изменило бы режим работы цепи.

Из-за большой индуктивности приборы электродинамической и электромагнитной систем не применяются для измерений в цепях с частотой выше 5—8 кГц.

Электростатический вольтметр на номинальное напряжение $U_{\text{н}} = 3 \text{ кВ}$ имеет емкость $C = 50 \text{ пф}$. Его реактивное сопротивление при частоте $f = 50 \text{ Гц}$

$$x_c = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{10^{12}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50} \approx 6 \cdot 10^7 \text{ ом},$$

а при частоте 5 МГц его сопротивление $x_c = 600 \text{ ом}$; следовательно, его применение в цепях с высокой частотой также невозможно.

Включение измерительного прибора в цепь изменяет параметры цепи за счет параметров прибора, оказывает влияние на режим работы цепи, а следовательно, и на

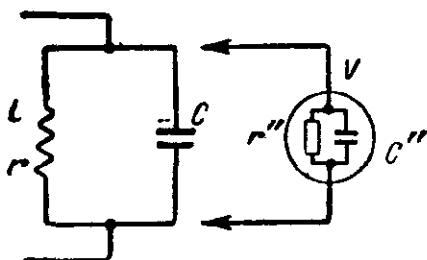


Рис. 8-12. Колебательный контур и вольтметр.

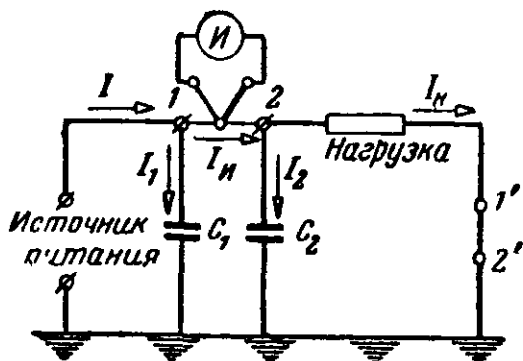


Рис 8-13 Неправильная схема включения термоэлектрического амперметра.

измеряемую величину, вызывая большую или меньшую погрешность измерения или делая измерение невозможным.

Значительное изменение режима работы цепи может иметь место в связи с явлением резонанса. Реактивные сопротивления измерительного механизма и реактивные сопротивления входных проводов или участков измерительной цепи могут образовать колебательный контур, собственная частота которого может оказаться близкой или равной частоте цепи. Или, наоборот, включение измерительного прибора в контур, настроенный в резонанс, может нарушать условия резонанса за счет параметров измерительного прибора. На рис. 8-12 изображен настроенный в резонанс контур r, L, C . Если к нему подключить вольтметр с параметрами r'' и C'' (рис. 8-11), то активное сопротивление и емкость контура изменятся,

что может привести к резкому изменению режима работы цепи и значительным погрешностям измерения.

При измерениях в цепях высокой частоты важным является выбор места включения прибора в цепь. Оно должно быть выбрано так, чтобы включение прибора по возможности не оказывало влияния на режим работы цепи и ее участков. При выборе следует стремиться к тому, чтобы прибор находился под потенциалом, близ-

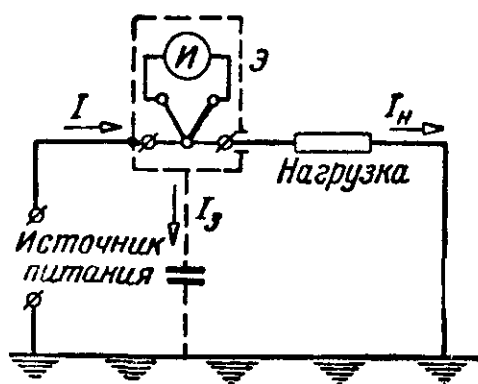


Рис. 8-14. Термоэлектрический амперметр с экраном.

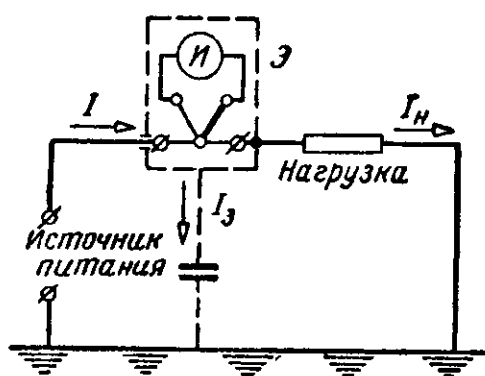


Рис. 8-15. Термоэлектрический амперметр с экраном (другая конструкция)

ким к потенциалу земли, в противном случае неизбежны погрешности измерений из-за влияния токов утечки.

На рис. 8-13 дана неправильная схема включения термоэлектрического амперметра в цепь. При напряжении источника питания 100 в, частоте 10^8 гц и входных емкостях 1 пф ток, идущий через каждую из емкостей, будет равен примерно 60 ма. Следовательно, ток амперметра будет на 60 ма меньше тока источника питания и на столько же больше тока в нагрузке.

Если включить тот же амперметр между точками 1' и 2', то вследствие ничтожной разности потенциалов между точками включения и землей токи через входные емкости проходить не будут.

Если нельзя включить прибор в участок цепи с низким потенциалом относительно земли, то для уменьшения погрешности измерения можно прибор поместить в металлический экран (рис. 8-14 и 8-15). Соединив экран с одним из зажимов прибора, получим разность потенциалов между прибором и экраном равной нулю; не будет и тока через входные емкости между прибором и экраном. Поэтому при соединении по схеме на

рис. 8-14 в приборе и нагрузке будет проходить один и тот же ток, а при соединении по схеме на рис. 8-15 одинаковый ток будет проходить в приборе и источнике питания.

Погрешности при измерениях в цепях высокой частоты могут происходить не только от влияния параметров прибора на режим работы цепи и изменения значения измеряемой величины, но также и от того, что последняя может измеряться неправильно. В самом деле, если в цепь измеряемого тока включен амперметр, схема которого дана на рис. 8-10,а, то часть измеряемого тока ответвится через емкость C_{12} и, следовательно, ток, идущий по измерительному механизму (ветвь r, L), которым определяется показание амперметра, будет меньше тока, идущего по цепи, подлежащего измерению. Погрешность, вызванная этим обстоятельством, будет увеличиваться с увеличением частоты. Она может быть особенно большой, если частота измеряемой цепи окажется близкой или равной частоте контура r, L и C (рис. 8-10,а) амперметра (собственная частота амперметра), что для высокочастотных амперметров иногда имеет место при частоте порядка 10^9 — 10^{10} гц.

С повышением частоты, а следовательно, с уменьшением длины волны линейные размеры цепей становятся соизмеримыми с длиной волны. При измерениях токов и напряжений в таких цепях показания приборов зависят от места их расположения в цепи, что требует внимательного отношения к выбору места включения в цепь.

При измерениях в цепях переменного тока высокой частоты необходимо также внимательно относиться к выбору измерительных приборов, применяя приборы только специальных конструкций, которые должны удовлетворять следующим основным требованиям:

1. Принцип работы прибора должен обеспечить наименьшее влияние частоты на показания прибора во всем диапазоне частот, в котором прибор будет использоваться.

2. Собственные емкости и индуктивность, входные емкости и индуктивности и мощность потерь в приборе должны быть по возможности малыми.

3. Частота собственных колебаний прибора должна быть по возможности высокой.

4. Линейные размеры прибора должны быть малы по сравнению с длиной волны измеряемой величины.

Чем выше частота, тем труднее изготовить прибор, удовлетворяющий указанным требованиям. Это является одной из причин того, что при частотах выше 10^9 — 10^{10} гц измерения тока и напряжения заменяются измерениями сопротивления и мощности.

К числу систем, пригодных для работы при повышенной и высокой частотах, относятся: термоэлектрическая, тепловая, электронная, выпрямительная и электростатическая.

Глава девятая

ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

А. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИБОРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

9-1. ЗАМЕЧАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К МЕТОДАМ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Сопротивление — один из важнейших параметров электрической цепи, определяющий работу любой цепи или установки.

Получение определенных величин сопротивлений при изготовлении электрических машин, аппаратов, приборов при монтаже и эксплуатации электроустановок является необходимой предпосылкой для обеспечения нормального режима их работы.

Одни сопротивления сохраняют свою величину практически неизменной, другие, наоборот, в очень сильной степени подвержены изменению от времени, от температуры, влажности, механических усилий и т. д. Поэтому, как при производстве электрических машин, аппаратов, приборов, так и при монтаже эксплуатации электроустановок неизбежно приходится производить измерение сопротивлений. Весьма разнообразны условия и требования к производству измерений сопротивлений. В одних случаях нужна высокая точность, в других, наоборот, достаточно нахождение приближенного значения сопротивления. В некоторых случаях измерение производится в естественных условиях, конкретизировать которые не представляется возможным, в других случаях, наобо-

рот, необходимо искусственно создать строго определенные условия для объекта измерения. В одних случаях решающим является быстрота производства измерения, в других она не имеет существенного значения. По своей величине сопротивления весьма разнообразны. Практически приходится измерять сопротивления, начиная от очень малых значений порядка 10^{-6} ом и кончая весьма большими сопротивлениями порядка 10^{15} — 10^{18} ом.

В зависимости от величины сопротивления делятся на три группы:

- 1 ом и меньше — малые сопротивления;
- от 1 ом до 0,1 Мом — средние сопротивления;
- от 0,1 Мом и выше — большие сопротивления.

При измерении малых сопротивлений необходимо принимать меры для устранения влияния на результат измерения сопротивления соединительных проводов, контактов и термо-э. д. с.

При измерении средних сопротивлений можно не считаться с сопротивлениями соединительных проводов и контактов, можно не учитывать влияния сопротивления изоляции.

При измерении больших сопротивлений необходимо учитывать наличие объемного и поверхностного сопротивлений, влияние температуры, влажности и других факторов.

При измерении сопротивлений, за исключением сопротивлений жидких проводников пользуются постоянным током, так как, с одной стороны, применение переменного тока сопряжено с получением погрешностей, связанных с влиянием емкости и индуктивности объекта измерения и измерительной цепи, а также с влиянием частоты переменного тока; с другой стороны, при использовании постоянного тока возможно применение приборов магнитоэлектрической системы, обладающих исключительной чувствительностью, точностью и рядом других положительных свойств.

Применение постоянного тока для измерения сопротивления жидких проводников или проводников, обладающих высокой влажностью, например сопротивлений заземлений, недопустимо, так как сопряжено с появлением погрешностей, связанных с явлением электролиза. Поэтому измерение сопротивлений жидких проводников производится на переменном токе.

В связи с изложенным, естественно, весьма разнообразны методы и приборы для измерения сопротивлений, и выбор того или иного метода для производства измерений требует учета большого числа факторов.

9-2. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ И БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ

К группе малых сопротивлений относятся: обмотки якорей электрических машин, сопротивления амперметров, шунтов, сопротивления обмоток трансформаторов

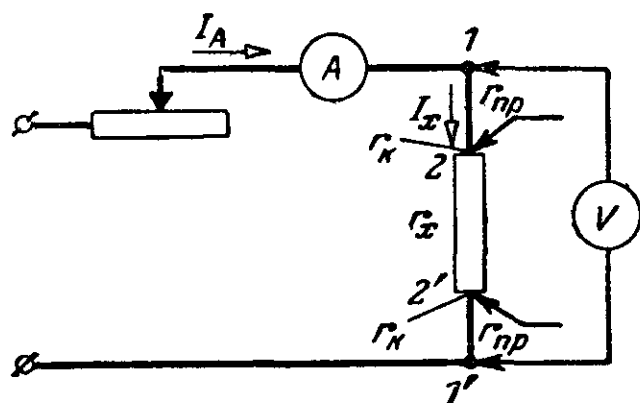


Рис. 9-1. Неправильная схема соединения для измерения малых сопротивлений амперметром и вольтметром.

тока, сопротивления коротких проводов шин и т. д.

При измерении малых сопротивлений всегда приходится считаться с возможностью влияния сопротивлений соединительных проводов и переходных сопротивлений на результат измерения. Первые из них имеют значения $1 \cdot 10^{-4}—1 \cdot 10^{-2}$ ом, вторые $1 \cdot 10^{-5}—1 \cdot 10^{-2}$ ом.

Под переходными сопротивлениями или сопротивлениями на контактах понимают сопротивления, которые встречает электрический ток при переходе с одного проводника на другой. Переходные сопротивления зависят от величины поверхности соприкосновения, от ее характера и состояния — гладкая или шероховатая, чистая или загрязненная, а также от плотности соприкосновения, силы нажатия и т. д.

Выясним на примере влияние переходных сопротивлений и сопротивлений соединительных проводов на результат измерения.

На рис. 9-1 дана схема для измерения сопротивления с применением образцовых приборов амперметра и вольтметра.

Допустим, искомое сопротивление $r_x=0,1$ ом, а сопротивление вольтметра $r_v=500$ ом. Так как они соединены параллельно, то

$$\frac{r_x}{r_v} = \frac{I_v}{I_x} = \frac{0,1}{500} = 0,0002,$$

т. е. ток в вольтметре составляет 0,02% от тока в искомом сопротивлении. Таким образом, с точностью до 0,02% можно считать ток амперметра равным току в искомом сопротивлении.

Разделив показание вольтметра, присоединенного к точкам 1, 1' на показание амперметра, получим:

$$\frac{U'_v}{I_A} = r'_x = r_x + 2r_{\text{пр}} + 2r_{\text{к}},$$

где r'_x — найденное значение искомого сопротивления;

$r_{\text{пр}}$ — сопротивление соединительного провода;

$r_{\text{к}}$ — сопротивление контакта.

Считая $r_{\text{пр}} = r_{\text{к}} = 0,01$ ом, получаем результат измерения

$$r'_x = 0,14 \text{ ом},$$

откуда погрешность измерения, обусловленная сопротивлениями соединительных проводов и сопротивлениями контактов,

$$\gamma = \frac{r'_x - r_x}{r_x} 100\% = \frac{0,14 - 0,1}{0,1} 100\% = 40\%.$$

Необходимо обратить внимание на то, что с уменьшением искомого сопротивления погрешность измерения от указанных выше причин увеличивается.

Присоединив вольтметр к токовым зажимам — точки 2—2 на рис. 9-1, т. е. к тем зажимам сопротивления r_x , к которым присоединены провода цепи тока, получим показание вольтметра U''_v меньше U'_v на величину падения напряжения в соединительных проводах и, следовательно, найденное значение искомого сопротивления

$$r''_x = \frac{U''_v}{I_A} = r_x + 2r_{\text{к}}$$

будет содержать погрешность, обусловленную только сопротивлениями на контактах.

Присоединив вольтметр, как показано на рис. 9-2, к потенциальным зажимам, расположенным между токо-

выми, получим показание вольтметра U'''_V меньше U''_V на величину падения напряжения на сопротивлениях контактов и, следовательно, найденное значение искомого сопротивления

$$r'''_x = \frac{U'''_V}{I_A} = r_x.$$

Таким образом, найденное значение будет равно действительному значению искомого сопротивления, так как

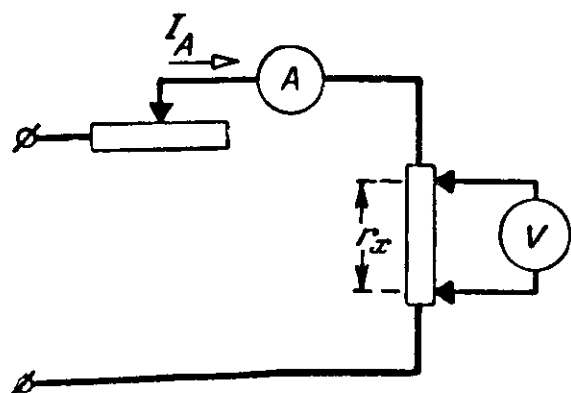


Рис 9-2. Правильная схема соединения для измерения малых сопротивлений амперметром и вольтметром

вольтметр измерит действительное значение напряжения на искомом сопротивлении r_x между его потенциальными зажимами.

Применение двух пар зажимов, токовых и потенциальных, является основным приемом для устранения влияния сопротивлений соединительных проводов и переходных сопротивлений на результат измерений малых сопротивлений.

Большими сопротивлениями обладают плохие проводники тока и изоляторы.

При измерении сопротивлений проводников с малой электропроводностью, изолирующих материалов и изделий из них приходится считаться с факторами, которые могут влиять на величину сопротивления их. К числу таких факторов прежде всего относится температура, например проводимость электрокартона при температуре 20°C равна $1,64 \cdot 10^{-13} \text{ 1/ом}$, а при температуре 40°C $21,3 \cdot 10^{-13} \text{ 1/ом}$. Таким образом, изменение температуры на 20°C вызвало изменение сопротивления (проводимости) в 13 раз!

Цифры наглядно показывают, насколько опасен недоучет влияния температуры на результаты измерения.

Точно так же весьма важным фактором, влияющим на величину сопротивления, является содержание влаги как в испытуемом материале, так и в воздухе. Например, поверхностное сопротивление фарфора на 1 см^2 при

влажности воздуха 10% равно $2 \cdot 10^{12}$ ом, а при влажности воздуха 60% оно равно $6,5 \cdot 10^{10}$ ом. Кроме того, на величину сопротивления могут влиять род тока, которым производится испытание, величина испытываемого напряжения, продолжительность действия напряжения и т. д.

При измерении сопротивлений изолирующих материалов и изделий из них приходится считаться также

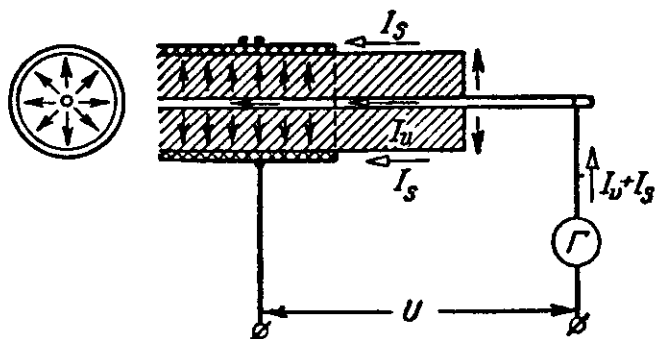


Рис 9-3 Поверхностный и объемный ток в кабеле

с возможностью прохождения тока по двум путям: 1) через объем испытываемого материала; 2) по поверхности испытываемого материала.

Способность материала проводить электрический ток тем или иным путем характеризуется величиной сопротивления, которое встречает ток на этом пути.

Соответственно имеются два понятия: объемное сопротивление, относимое к 1 см^3 материала, и поверхностное сопротивление, относимое к 1 см^2 поверхности материала.

Для иллюстрации рассмотрим пример.

При измерении сопротивления изоляции кабеля при помощи гальванометра могут получиться большие погрешности, вследствие того что гальванометр может измерять (рис. 9-3):

а) ток I_v , идущий от жилы кабеля к его металлической оболочке через объем изоляции (ток I_v , обусловленный объемным сопротивлением изоляции кабеля, характеризует сопротивление изоляции кабеля);

б) ток I_s , идущий от жилы кабеля к его оболочке по поверхности изолирующего слоя (I_s , обусловленный поверхностным сопротивлением, зависит не только от свойств изолирующего материала, но и от состояния его поверхности).

Для устранения влияния поверхностей проводимости при измерении сопротивления изоляции на изолирующий слой накладывается виток проволоки (охранное кольцо), который соединяют, как указано на рис. 9-4.

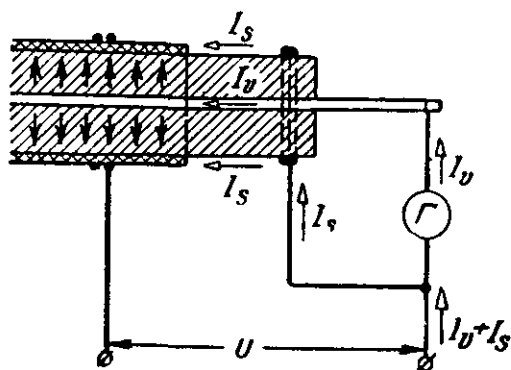


Рис 9-4. Схема для измерения объемного тока кабеля.

Тогда ток I_s будет проходить помимо гальванометра и не внесет погрешности в результаты измерения.

На рис. 9-5 дана принципиальная схема для определения объемного удельного сопротивления изолирующего материала — пластины А. Здесь ББ — электроды, к которым приложено напряжение U ; Г — гальванометр, измеряющий ток, обусловленный объемным сопротивлением пластины А; В — охранное кольцо.

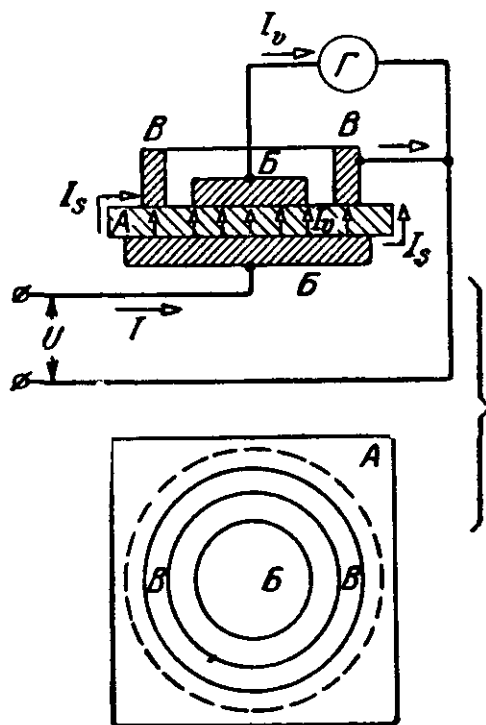


Рис. 9-5. Измерение объемного сопротивления твердого диэлектрика.

На рис. 9-6 дана принципиальная схема для определения поверхностного удельного сопротивления изолирующего материала (пластина А).

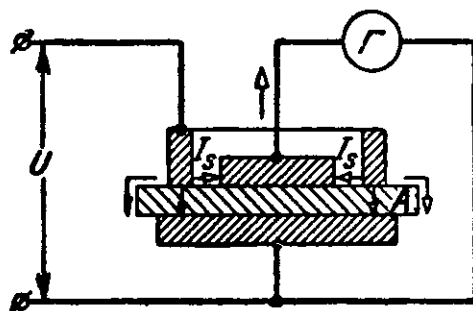


Рис. 9-6. Измерение поверхностного сопротивления твердого диэлектрика.

При измерении больших сопротивлений следует также обращать серьезное внимание на изоляцию самой измерительной установки, так как в противном случае через гальванометр будет проходить ток, обусловленный сопротивлением изоляции самой установки, что повлечет за собой соответствующую погрешность измерения.

Рекомендуется применять экранирование или перед измерением производить проверку изоляции измерительной установки.

9-3. ОММЕТРЫ

Приборы для непосредственного измерения сопротивления называются омметрами или мегомметрами.

Омметры делятся на две группы: омметры с однорамочным измерительным механизмом, показания которых зависят от напряжения источника питания, и омметры с двухрамочным измерительным механизмом или омметры — логометры, показания которых не зависят от напряжения источника питания.

а) Омметры с однорамочным измерительным механизмом

Эти омметры могут иметь две измерительные схемы: последовательную и параллельную.

Омметр с последовательной схемой (рис. 9-7) представляет собой обычный однорамочный измерительный механизм магнитоэлектрической системы с добавочным сопротивлением r_d , последовательно с которым включается измеряемое сопротивление r_x . Омметр обычно имеет или самостоятельный источник питания, встроенную батарею сухих элементов, или питается от внешней батареи.

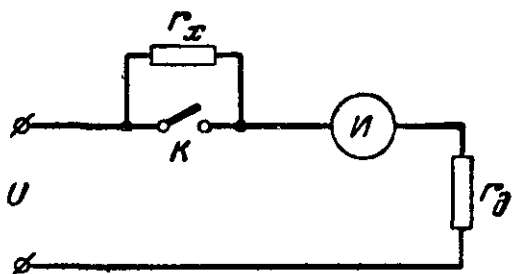


Рис. 9-7 Омметр с последовательной схемой.

При разомкнутом рубильнике K тск в измерительном механизме

$$I = C_I \alpha = \frac{U}{r_x + r_{\text{и}} + r_d} = \frac{U}{r_x + r},$$

откуда угол поворота подвижной части

$$\alpha = \frac{U}{C_I} \frac{1}{r_x + r}, \quad (9-1)$$

где $r = r_{\text{и}} + r_d$ — постоянное для данного омметра сопротивление.

Если отношение $\frac{U}{C_I}$ не меняется, то угол отклонения подвижной части омметра зависит только от искомого сопротивления; следовательно, шкала прибора может быть проградуирована в значениях сопротивления.

Батарея сухих элементов меняет свое напряжение с течением времени. Поэтому омметры, предназначенные для работы с такими батареями, имеют приспособление для поддержания отношения $\frac{U}{C_I}$ постоянным путем регулировки величины $C_I = \frac{D}{BS\omega}$.

Таким приспособлением является магнитный шунт.

Он представляет собой пластину из мягкого ферромагнитного материала, которая расположена около полюсных башмаков. Изменяя положение магнитного шунта относительно полюсных башмаков при помощи винта, головка которого выведена наружу кожуха, можно изменять магнитную индукцию в воздушном зазоре измерительного механизма. Регулировка производится следующим образом: при подключенной батарее замыкают рубильник K (что соответствует короткому замыканию r_x на рис. 9-7) и поворотом головки регулировочного винта

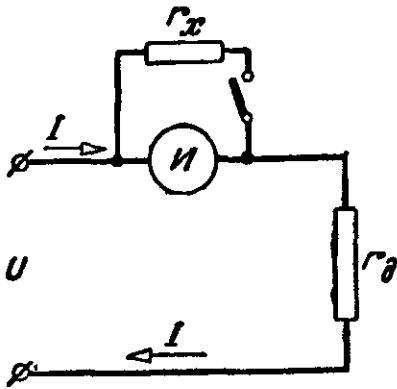


Рис 9-8 Омметр с параллельной схемой.

устанавливают стрелку прибора на контрольную отметку шкалы, которая при данной схеме совпадает с нулевым делением шкалы омметра. После этого размыкают рубильник K и производят измерение искомого сопротивления.

Вторым часто применяемым способом поддержания отношения U/C_I постоянным является шунтирование измерителя регулируемым сопротивлением. При этом процесс регулировки остается таким же, как и при магнитном шунте.

Омметр с параллельной схемой (рис. 9-8) представляет собой обычный однорабочный измерительный механизм магнитоэлектрической системы с добавочным со-

противлением. Измеряемое сопротивление включается параллельно измерительному механизму.

Ток в неразветвленной части цепи

$$I = \frac{U}{r_d + \frac{r_x r_n}{r_x + r_n}}.$$

Напряжение на измерительном механизме

$$I_n r_n = I \frac{r_x r_n}{r_x + r_n}.$$

Из этих уравнений следует, что ток в измерительном механизме

$$\begin{aligned} I_n = C_I \alpha &= I \frac{r_x}{r_x + r_n} = \frac{U}{r_d + \frac{r_x r_n}{r_x + r_n}} \cdot \frac{r_x}{r_x + r_n} = \\ &= \frac{U r_x}{r_x r_d + r_d r_n + r_x r_n} = \frac{U}{r_d + r_n + \frac{r_d r_n}{r_x}} = \frac{U}{k_1 + \frac{k_2}{r_x}}, \end{aligned}$$

где $k_1 = r_d + r_n$; $k_2 = r_d r_n$ — постоянные для данного омметра величины.

Из написанного уравнения следует, что

$$\alpha = \frac{U}{C_I} \frac{1}{k_1 + \frac{k_2}{r_x}}. \quad (9-2)$$

Таким образом, при неизменном для данного омметра отношении $\frac{U}{C_I}$ угол поворота подвижной части прибора зависит только от измеряемого сопротивления и, следовательно, шкала прибора может быть проградуирована в значениях сопротивления.

Как и в случае омметра с последовательной схемой, перед измерением необходима регулировка отношения $\frac{U}{C_I}$. Эта регулировка производится при отсоединенном

измеряемом сопротивлении r_x или путем установки магнитного шунта в положение, при котором стрелка омметра устанавливается на контрольной отметке шкалы (совпадающей с делением шкалы ∞), или путем анало-

гичной регулировки переменного сопротивления, включаемого последовательно с добавочным сопротивлением.

Так как относительно малые измеряемые сопротивления при последовательном соединении с измерительным механизмом и добавочным сопротивлением мало влияют на величину тока измерительного механизма, также и относительно большие измеряемые сопротивления при параллельном присоединении к измерительному меха-

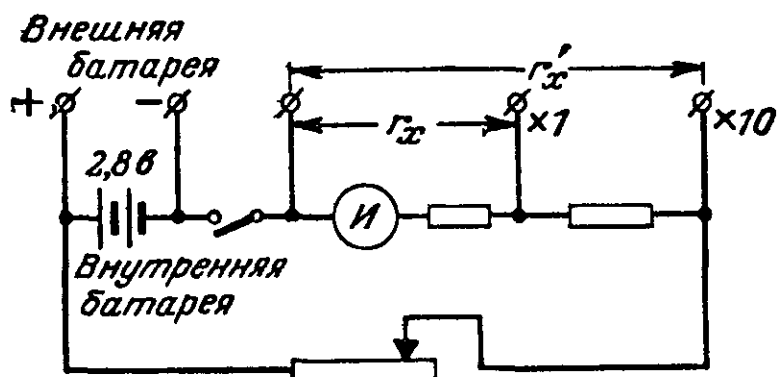


Рис. 9-9. Схема омметра М-371.

низму, то последовательная схема применяется для измерения больших, а параллельная схема — для измерения относительно малых сопротивлений.

В качестве примера на рис. 9-9 дана схема омметра типа М-371, выпускаемого электротехнической промышленностью СССР. Он имеет два предела измерения 10 ом и 100 ом. Здесь применены параллельная схема и соответственно регулировка при помощи последовательно включенного сопротивления r_p . Приборы того же типа, но с пределами измерения 100—1000—10 000 ом или 100 ком — 10 Мом имеют последовательную схему. Омметры этого типа имеют класс точности 1,5.

б) Омметры с двухрамочным измерительным механизмом (омметры — логометры)

Омметры, показания которых не зависят от напряжения источника питания, имеют измерительный механизм логометра магнитоэлектрической системы (рис. 4-7).

Если две рамки вместе с последовательно соединенными с ними сопротивлениями образуют две параллельные ветви (рис. 9-10), в одной из которых имеются измеряемое и добавочное сопротивление $r_1 + r_{д1} + r_x = k_1 + r_x$,

а в другой — добавочное сопротивление $r_2 + r_{д2} = k_2$, то, приняв во внимание, что токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям, можно написать:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{k_2}{k_1 + r_x}\right). \quad (9-3)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части логометра зависит только от величины измеряемого сопротивления.

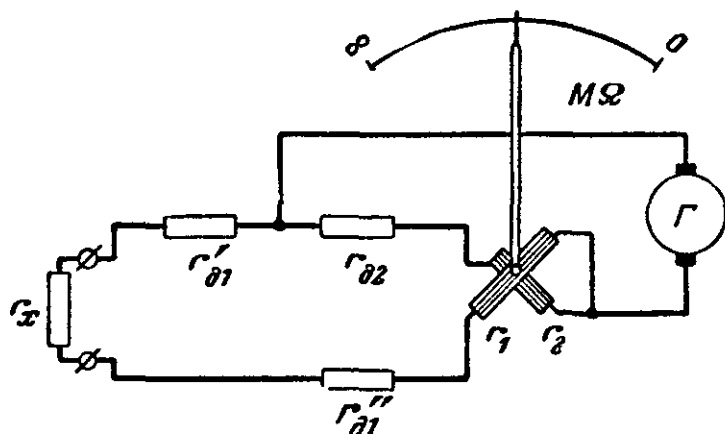


Рис. 9-10. Последовательная схема омметра — логометра.

тивления и, следовательно, по углу поворота можно определить сопротивление r_x .

Питание двух параллельных ветвей логометра производится или от батареи элементов, или от сети переменного тока через трансформатор и выпрямитель, или, наконец, от встроенного магнитоэлектрического генератора постоянного тока, приводимого во вращение от руки. Неравномерность вращения, вызывающая непостоянство напряжения на ее зажимах, не влияет на отношение токов I_1/I_2 , а следовательно, не влияет и на показание омметра.

Аналогично омметрам, показания которых зависят от напряжения источника питания, омметры — логометры могут иметь две измерительные схемы: последовательную, рассмотренную выше и применяемую для больших пределов измерения, и параллельную — для меньших пределов измерения, изображенную на рис. 9-11.

В мегомметрах наряду с двумя зажимами, предназначенными для присоединения измеряемого сопротивления, иногда предусматривается третий зажим Э

(рис. 9-12), предназначенный для присоединения экрана — охранного электрода — для отвода тока поверхностной проводимости помимо измерительной рамки.

В качестве примера на рис. 9-12 дана схема внутреннего соединения мегомметра типа М-1101, разработанного В. О. Артюновым и изготавливаемого одним из заводов электротехнической промышленности.

Он имеет два предела измерения: 1000 ком и 500 Мом (параллельная и последовательная схемы); генератор с номинальным напряжением 500 в. Погрешность его составляет $\pm 1\%$.

Кроме того, наша промышленность выпускает ряд омметров, в том числе; 1) микроомметр типа М-246

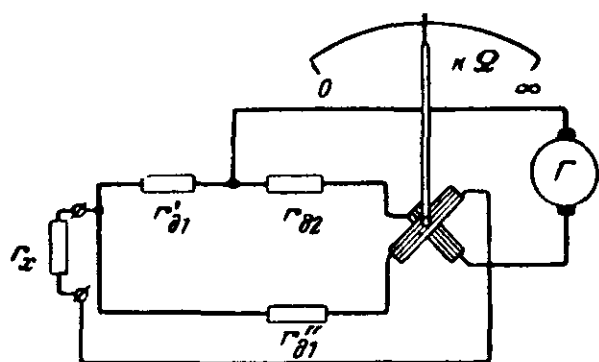


Рис. 9-11 Параллельная схема омметра—логометра.

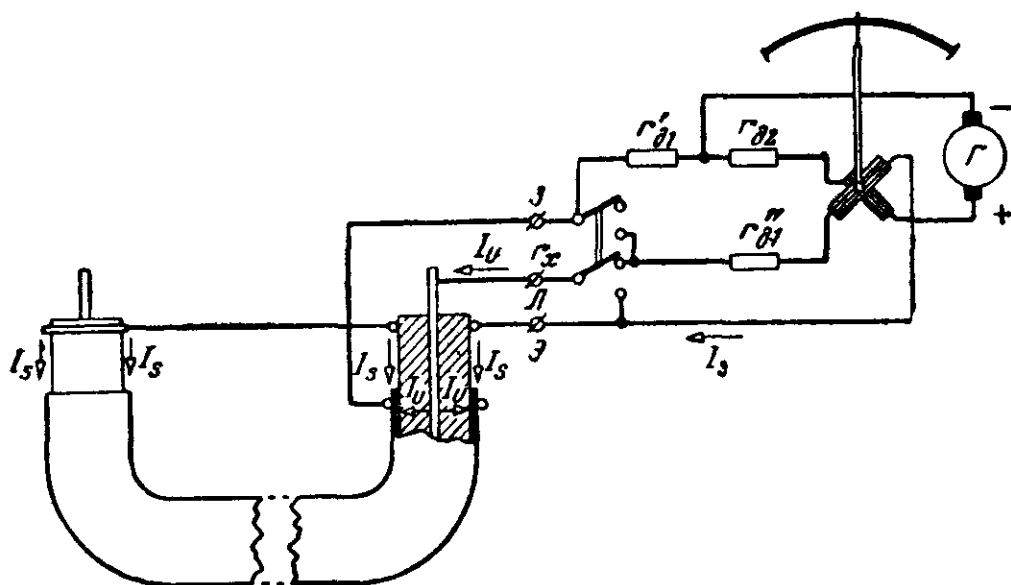


Рис. 9-12. Схема соединения мегомметра типа М1101 для измерения сопротивления изоляции кабеля.

с двухрамочным измерительным механизмом с питанием от сети переменного тока с напряжением 110—127 или 220 в, с пределами измерения 100; 1000 мком; 10; 100 и 1000 Мом. Погрешность его составляет $\pm 2,5\%$; 2) ом-

метр типа М-218 с двухрамочным измерительным механизмом, с питанием от сети переменного тока 110—127 или 220 в, с пределами измерений 1; 10; 100 ом; 1; 10; 100 ком; 1; 10 Мом.

9-4. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Согласно закону Ома сопротивление проводника равно отношению напряжения U на его зажимах к величине тока I в проводнике:

$$r_x = \frac{U}{I}.$$

Измерив U и I , можно определить r_x .

Практически могут иметь место две схемы.

При измерении по первой схеме (рис. 9-13, а), вольтметр измеряет не только подлежащее определению напряжение на сопротивлении r_x , но и напряжение U_A на амперметре. Следовательно, в формулу для определения сопротивления нужно подставить величину показаний вольтметра U_V за вычетом падения напряжения на амперметре U_A , т. е.

$$r_x = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V - I_A r_A}{I_A} = \frac{U_V}{I_A} - r_A, \quad (9-4)$$

где I_A — ток, измеряемый амперметром;

r_A — сопротивление амперметра.

Этой схемой следует пользоваться в тех случаях, когда измеряемое сопротивление велико по сравнению с со-

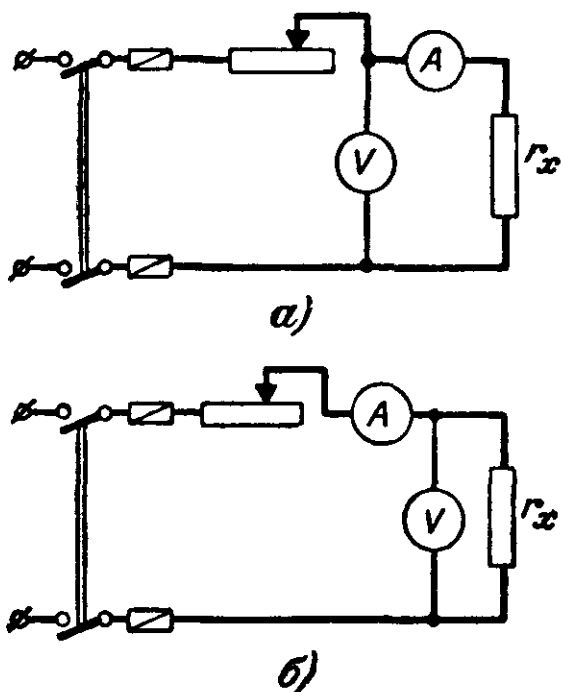


Рис 9-13. Схема соединения для измерения средних сопротивлений амперметром и вольтметром

а — измеряемое сопротивление велико по сравнению с сопротивлением амперметра; б — измеряемое сопротивление мало по сравнению с сопротивлением вольтметра.

противлением амперметра (раз в 100 больше). В этом случае напряжением на амперметре можно пренебречь вследствие его малости, и просто писать:

$$r'_x = \frac{U_V}{I_A}. \quad (9-5)$$

При измерении по второй схеме (рис. 9-13,б) амперметр измеряет не только подлежащий определению ток I в сопротивлении r_x , но и ток в вольтметре I_V . Следовательно, в формулу для определения сопротивления следует подставить величину тока амперметра за вычетом тока вольтметра, т. е.

$$r_x = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{r_V}}. \quad (9-6)$$

Этой схемой следует пользоваться в тех случаях, когда измеряемое сопротивление мало по сравнению с сопротивлением вольтметра (раз в 100 и больше), так как в этом случае ток вольтметра будет мал по сравнению с током в искомом сопротивлении и, следовательно, им можно будет пренебречь, определяя искомое сопротивление по упрощенной формуле

$$r''_x = \frac{U_V}{I_A}. \quad (9-7)$$

При точных измерениях следует пользоваться формулой (9-4) или (9-6) в зависимости от схемы включения.

Необходимо иметь в виду, что при измерении сопротивлений этим методом ток в искомом сопротивлении может вызвать его нагревание, следовательно, и изменение величины его.

Реостат, показанный на рис. 9-13, дает возможность установить в цепи такой ток, при котором нагревание измеряемого сопротивления практически отсутствует, или, наоборот, — установить такой температурный режим, при котором необходимо измерить сопротивление.

9-5. ИЗМЕРЕНИЕ БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ГАЛЬВАНОМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Принципиальная схема этого метода дана на рис. 9-14. Здесь r_x — искомое сопротивление; r — образцовое сопротивление (0,1—1 Мом); Γ — гальванометр; \mathcal{W} — многопредельный шунт.

Поставив рукоятку шунта в положение наименьшей чувствительности, замыкаем рубильники K_1 и K_2 . Затем,

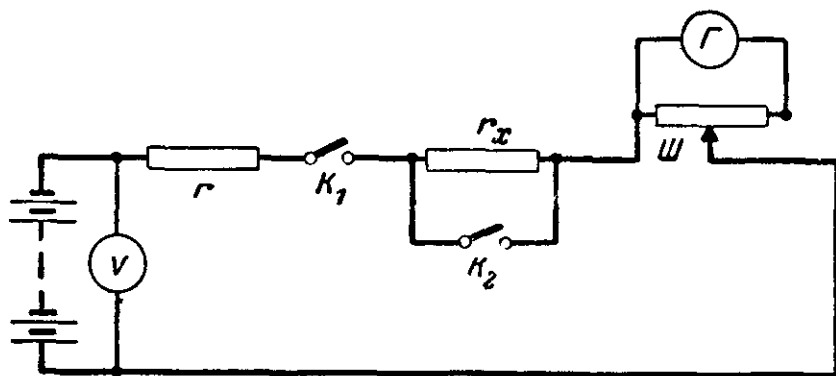


Рис. 9-14. Схема для измерения больших сопротивлений гальванометром и вольтметром.

перемещая рукоятку шунта, увеличиваем чувствительность гальванометра до тех пор, пока не получим достаточного для отсчета отклонения гальванометра ($1/2$ шкалы).

Для этого случая ток цепи (сопротивлением шунтированного гальванометра пренебрегаем)

$$I' = C_I p' \alpha' = \frac{U'}{r}, \quad (9-8)$$

где C_I — постоянная гальванометра по току;

p' — шунтирующий множитель;

α' — число миллиметров шкалы, на которое отклоняется гальванометр;

U' — показание вольтметра.

Из написанной формулы можно определить постоянную гальванометра

$$C_I = \frac{U'}{r p' \alpha'}. \quad (9-9)$$

После определения постоянной размыкаем рубильник K_2 .

Изменяя шунтом чувствительность, получим новое отклонение гальванометра.

Замечая показания гальванометра и вольтметра, можно определить искомое сопротивление

$$r_x + r = \frac{U''}{I''} = \frac{U''}{C_1 \rho'' \alpha''} \text{ или } r_x = \frac{U''}{C_1 \rho'' \alpha'} - r. \quad (9-10)$$

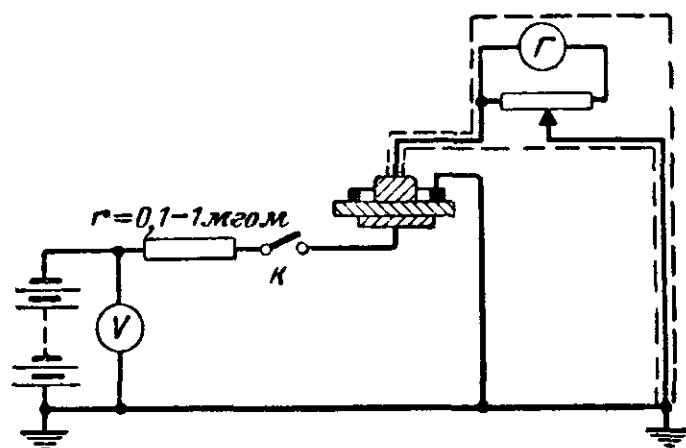


Рис 9-15 Схема для измерения объемного удельного сопротивления.

На рис. 9-15 дана более детальная схема для определения объемного удельного сопротивления изолирующего материала.

Для устранения влияния паразитных токов на показания гальванометра провод, соединяющий верхний электрод с гальванометром и землей, включают в заземленную металлическую трубку и хорошо от нее изолируют, а шунт и гальванометр устанавливают на заземленном металлическом листе.

9-6. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИИ МЕТОДОМ ВОЛЬТМЕТРА

Схема соединения для этого метода дана на рис. 9-16.

Поставив переключатель в положение 1, вольтметром измерим напряжение цепи U . Поставив переключатель

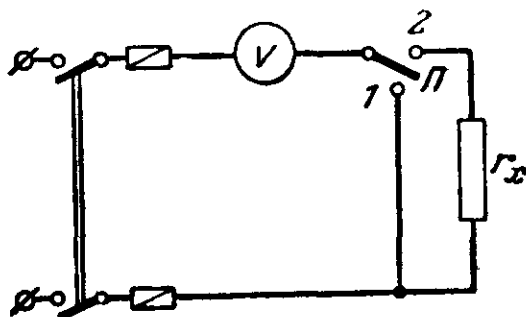


Рис 9-16 Схема для измерения сопротивления вольтметром.

в положение 2, измерим вольтметром напряжение U_V , составляющее часть напряжения цепи, которое будет на его зажимах, так как другая часть напряжения цепи U_x будет на измеряемом сопротивлении

Так как при последовательном соединении сопротивлений напряжения на них распределяются пропорционально их сопротивлениям, то

$$\frac{U_V}{U_x} = \frac{U_V}{U - U_V} = \frac{r_V}{r_x}, \quad (9-11)$$

откуда измеряемое сопротивление

$$r_x = r_V \frac{U - U_V}{U_V} = r_V \left(\frac{U}{U_V} - 1 \right). \quad (9-12)$$

Измеряемое сопротивление должно быть соизмеримо с сопротивлением вольтметра, так как при очень малых относительно вольтметра измеряемых сопротивлениях они почти не влияют на показания вольтметра. При очень больших относительно вольтметра измеряемых сопротивлениях показания вольтметра будут малыми и, следовательно, будет низкая точность измерения напряжения, а следовательно, и сопротивления. Для измерений предпочтительно пользоваться вольтметром магнитоэлектрической системы.

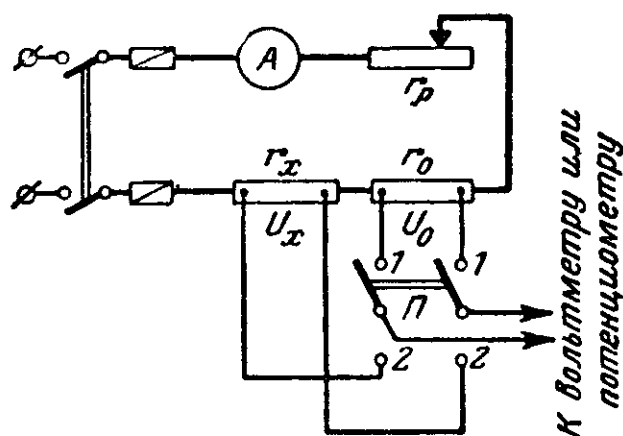
Б. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ

9-7. ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ И СРЕДНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С ОБРАЗЦОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ПРИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ

На рис. 9-17 дана последовательная схема соединения для измерения малых сопротивлений методом сравнения с образцовым сопротивлением — катушкой сопротивления.

Замкнув двухполюсный рубильник, установим реостатом r_p ток в цепи не выше допустимого значения для каждого из сопротивлений r_x и r_0 . Поставив ножи переключателя в положение 1, измеряют вольтметром или потенциометром напряжение U_0 на потенциальных зажимах образцовой катушки сопротивления r_0 . Переключо-

чив ножи переключателя в положение 2, измеряют напряжение U_x на потенциальных зажимах измеряемого сопротивления r_x . Вторично поставив ножи переключателя в положение 1, проверяют, осталось ли напряжение на образцовой катушке неизменным, что возможно



только при неизменном значении тока в цепи.

Так как при измерении напряжений через сопротивления r_x и r_0 проходит один и тот же ток, то

$$\frac{U_x}{r_x} = \frac{U_0}{r_0},$$

откуда

$$r_x = r_0 \frac{U_x}{U_0}. \quad (9-13)$$

Рис. 9-17. Схема для измерения малых сопротивлений методом сравнения с образцовым сопротивлением.

Образцовая катушка должна иметь сопротивление того же порядка, что и измеряемое сопротивление. При применении вольтметра необходимо, чтобы он обладал большим по сравнению с сопротивлениями r_x и r_0 сопротивлением, с тем, чтобы эквивалентное сопротивление разветвления при подключении вольтметра с достаточной точностью было равно соответствующему сопротивлению.

При измерении средних сопротивлений нет необходимости применять потенциальные зажимы.

9-8. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ СРАВНЕНИЯ С ОБРАЗЦОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОМ СОЕДИНЕНИИ

На рис. 9-18 дана параллельная схема соединения для измерения сопротивлений методом сравнения с образцовым сопротивлением.

При замкнутом двухполюсном рубильнике токи в параллельных ветвях распределяются обратно пропорционально их сопротивлениям, следовательно,

$$\frac{I_x}{I_0} = \frac{r_0}{r_x},$$

откуда

$$r_x = r_0 \frac{I_0}{I_x}. \quad (9-14)$$

Зная сопротивление r_0 образцовой катушки и измерив токи амперметрами или потенциометром (рис. 9-19), по формуле (9-14) определяют измеряемое сопротивление.

Образцовая катушка должна иметь сопротивление того же порядка, что и измеряемое сопротивление.

Сопротивления амперметров должны быть малы по сравнению с соответствующими сопротивлениями r_x и r_0 .

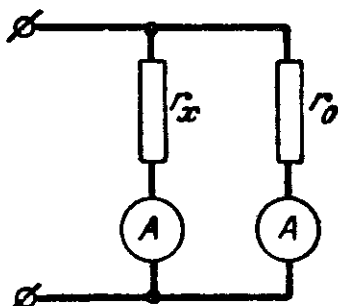


Рис. 9-18. Параллельная схема для измерения сопротивления методом сравнения с образцовым сопротивлением.

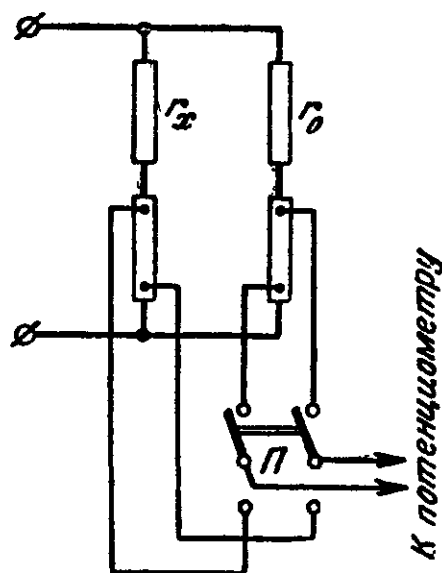


Рис. 9-19. Параллельная схема для измерения сопротивления методом сравнения с образцовым сопротивлением с применением потенциометра.

9-9. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ МЕТОДОМ ЗАМЕЩЕНИЯ

На рис. 9-20 даны соединения для измерений средних сопротивлений методом замещения.

Поставив переключатель сначала в положение 1, а затем 2, измеряют токи I_0 и I_x .

Полагая напряжение цепи неизменным и пренебрегая сопротивлением амперметра, получаем:

$$\frac{U}{r_x} : \frac{U}{r_0} = \frac{I_x}{I_0} = \frac{r_0}{r_x},$$

откуда

$$r_x = r_0 \frac{I_0}{I_x}. \quad (9-15)$$

Если отрегулировать образцовое сопротивление так, чтобы токи I_x и I_0 были одинаковы, то получим

$$r_x = r_0. \quad (9-16)$$

При измерении больших сопротивлений этим методом амперметр заменяется гальванометром с многопредельным шунтом (рис. 9-21).

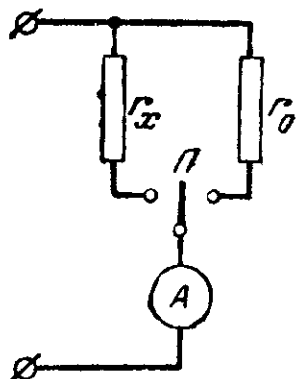


Рис. 9-20
Схема для измерения средних сопротивлений методом замещения.

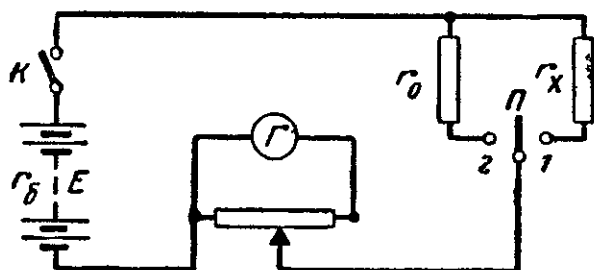


Рис. 9-21. Схема для измерения больших сопротивлений методом замещения.

Поставив рукоятку шунта в положение наименьшей чувствительности, ставят переключатель в положение 1, замыкают рубильник и повышают чувствительность до нужной величины.

В этом случае ток в цепи

$$I = C_1 p \alpha = \frac{E}{r_x + r_r + r_δ}. \quad (9-17)$$

Поставив переключатель в положение 2, изменением образцового сопротивления добьемся того же отклонения гальванометра α при том же шунтирующем множителе p ; тогда

$$I = C_1 p \alpha = \frac{E}{r_0 + r_r + r_δ}. \quad (9-18)$$

Из уравнений (9-17) и (9-18) следует, что при неизменных E , r_r и $r_δ$ имеет равенство

$$r_x = r_0. \quad (9-19)$$

При измерении весьма больших сопротивлений, например, изоляции кабеля или поверхностного сопротивления изоляторов, часто пользуются несколько измененным методом.

В схеме, данной на рис. 9-22, вместо магазина сопротивлений применяют образцовое сопротивление $r_0 = 0,1—1 \text{ Мом}$ и искомое сопротивление определяют сле-

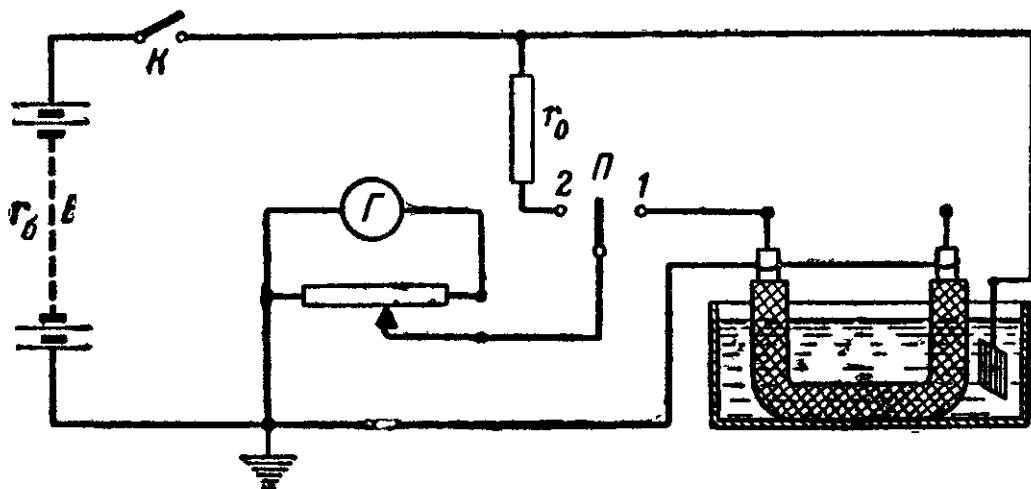


Рис. 9-22. Схема для измерения сопротивления изоляции кабеля.

дующим образом. Поставив рукоятку шунта в положение наименьшей чувствительности, замыкают рубильник K и ставят переключатель в положение 1. Затем шунтом повышают чувствительность до необходимой величины и замечают отклонение гальванометра α' и шунтирующий множитель p' . Тогда ток в цепи батарея — гальванометр — искомое сопротивление

$$I' = C_1 p' \alpha' = \frac{E}{r_x + r_g + r_0} \approx \frac{E}{r_x}. \quad (9-20)$$

После этого понижают чувствительность гальванометра, ставят переключатель в положение 2, повышают чувствительность до нужной величины и снова замечают отклонение гальванометра α'' и шунтирующий множитель p'' .

В этом случае ток в цепи батарея — гальванометр — образцовое сопротивление

$$I'' = C_1 p'' \alpha'' = \frac{E}{r_0 + r_g + r_0} \approx \frac{E}{r_0}. \quad (9-21)$$

Поделив почленно равенство (9-21) на (9-20), получим:

$$\frac{C_1 p'' \alpha''}{C_1 p' \alpha'} = \frac{r_x}{r_0},$$

откуда

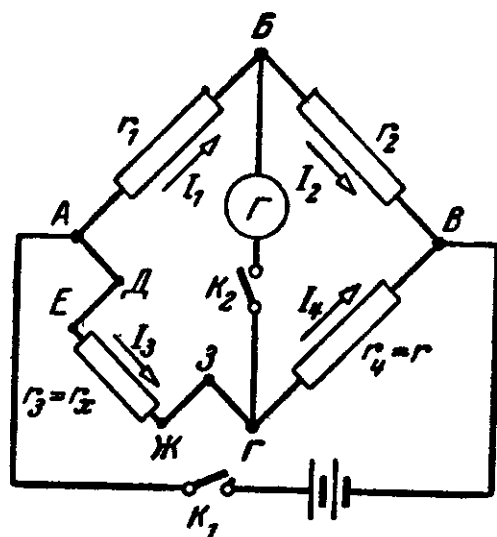
$$r_x = r_0 \frac{p'' \alpha''}{p' \alpha'}. \quad (9-22)$$

При измерении сопротивления изоляции кабеля во избежание повреждения гальванометра зарядным током перед включением напряжения гальванометр необходимо замыкать накоротко, и только по прошествии 1—2 мин после включения напряжения можно включать гальванометр.

Согласно нормам при заводском испытании кабеля сопротивление изоляции кабеля, измеренное при постоянном токе напряжением не менее 100 в и приведенное к температуре 15° С, должно быть для всех сечений и напряжений кабеля не ниже 100 Мом/км. При испытании кабеля после прокладки сопротивление изоляции его вместе со смонтированными муфтами должно быть не меньше 15 Мом/км.

9-10. ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОДИНАРНЫМ МОСТОМ

Одинарный мост (рис. 9-23) состоит из трех магазинов сопротивлений r_1 , r_2 и r , которые вместе с измеряемым сопротивлением r_x образуют замкнутый четырехугольник $AB\Gamma\Delta$, в одну из диагоналей которого включается гальванометр, а в другую — элемент.



Можно подобрать сопротивления r_1 , r_2 и r таким образом, что при замкнутых кнопках K_1 и K_2 ток через гальванометр не пойдет. В этом случае потенциалы точек B и Γ будут одинаковы, и мы сможем написать:

$$U_{AB} = U_{A\Gamma} \text{ или } I_1 r_1 = I_3 r_x;$$

и

$$U_{BV} = U_{\Gamma B} \text{ или } I_2 r_2 = I_4 r.$$

Рис. 9-23. Схема одинарного моста.

Разделив почленно одно уравнение на другое, получим:

$$\frac{I_1 r_1}{I_2 r_2} = \frac{I_3 r_x}{I_4 r}.$$

Так как ток в гальванометр не ответвляется, то $I_1 = I_2$ и $I_3 = I_4$. Произведя сокращение, получаем:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_x}{r} \text{ или } r_1 r = r_2 r_x,$$

откуда

$$r_x = r \frac{r_1}{r_2}. \quad (9-23)$$

Полученное соотношение сохраняется, если гальванометр и источник питания поменять местами.

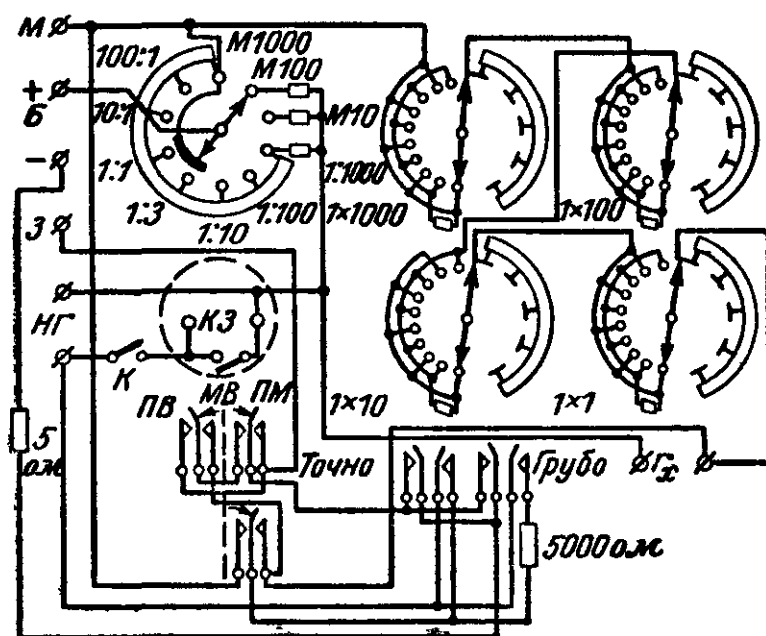


Рис 9-24. Схема универсального моста типа УМБ.

Для измерения присоединяют искомое сопротивление и источник питания. Берут сопротивления r_1 и r_2 в «плечах отношения», близкие к предполагаемому значению искомого сопротивления, и начинают подбирать плечо сравнения r до тех пор, пока стрелка гальванометра не установится на нуле шкалы при замкнутых кнопках K_1 и K_2 . Достигнув этого равновесия, подставляют значения сопротивлений в формулу (9-23) и подсчитывают величину искомого сопротивления.

На рис. 9-24 дана схема универсального моста типа УМБ.

В этом мосте плечи отношения r_1/r_2 выполнены в одном магазине сопротивлений, переключатель которого, соединенный с одним полюсом источника питания, делит сопротивление магазина в отношениях: 100/1, 10/1, 1/1, 1/3, 1/10, 1/100 и 1/1 000. Сравнительное плечо образуется четырьмя пятикатушечными декадами: $1 \times 9 + 10 \times 9 + 100 \times 9 + 1\,000 \times 9$ ом. Точность при измерении сопро-

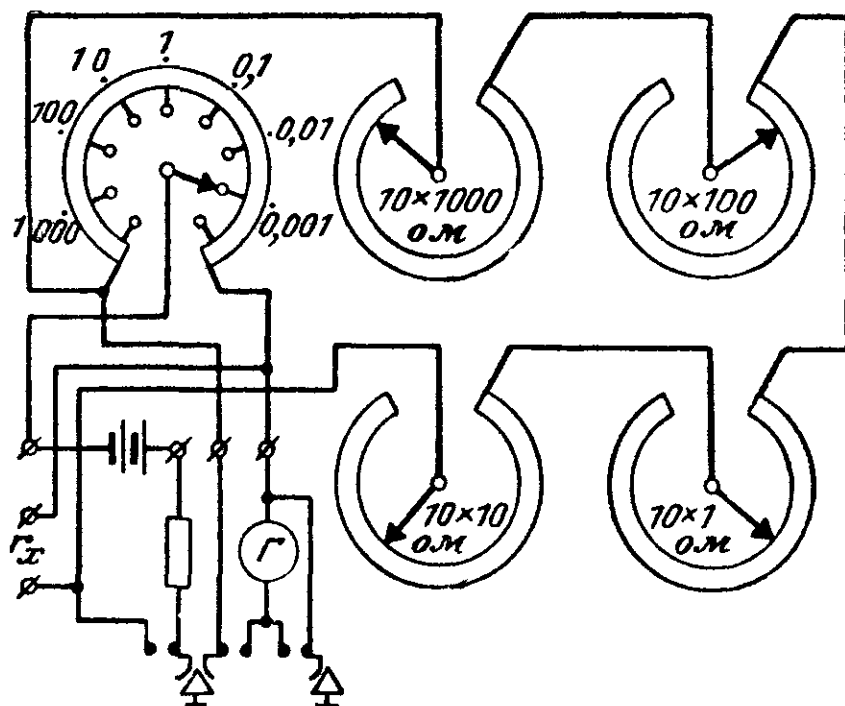


Рис. 9-25. Схема моста типа МКМВ.

тивлений в пределах $1 \div 100\,000$ ом составляет $\pm 0,5\%$. Мост может быть использован для измерений сопротивлений, для определения места повреждения изоляции линии и, наконец, в качестве четырехдекадного магазина сопротивлений.

На рис. 9-25 дана схема моста типа МКМВ, выпускаемого нашей электротехнической промышленностью.

В этом мосте плечи отношения — магазин сопротивлений с восемью катушками, дающими возможность получить отношение плеч: 0,001; 0,01; 1; 10; 100; 1000. Плечо сравнения — магазин сопротивлений с четырьмя декадами по 10 катушек, с сопротивлениями катушек 1, 10, 100 и 1 000 ом. Мост имеет встроенные гальванометр и батарею элементов с напряжением 4,5 в. При измерении сопротивлений выше 10 000 ом применяют внешний источник питания с напряжением 24 в и гальва-

нометр более высокой чувствительности. Класс точности моста — 0,2.

Наряду с рассмотренными магазинными мостами применяются реохордные мосты (рис. 9-26), у которых плечи отношений создаются не магазинами сопротивлений, а калиброванной манганиновой проволокой (реохорд), разделенной подвижным контактом на две ча-

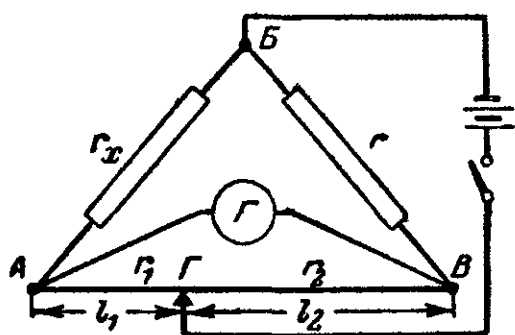


Рис. 9-26. Схема линейного (реохордного) моста.

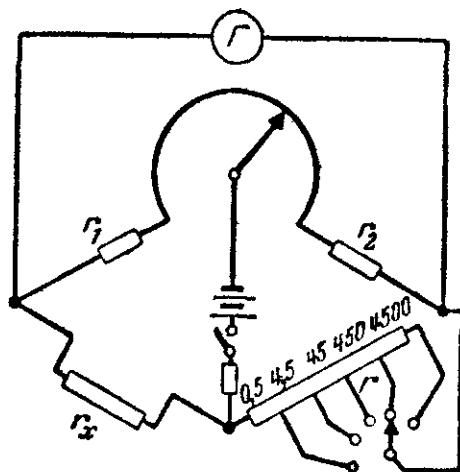


Рис. 9-27. Схема моста типа ММВ.

сти — два плеча моста. Так как сопротивление такой проволоки, имеющей одинаковое сечение и однородный материал, пропорционально длине, то отношение сопротивлений двух участков ее равно отношению длин этих участков:

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{\rho \frac{l_1}{S}}{\rho \frac{l_2}{S}} = \frac{l_1}{l_2}. \quad (9-24)$$

Это отношение обычно наносится на шкале моста, расположенной параллельно калиброванной проволоке, что дает возможность непосредственно по положению движка определить это отношение.

Такая конструкция моста дает несколько меньшую точность, так как сечение проводника в разных местах его может несколько изменяться вследствие износа. На рис. 9-27 дана схема подобного моста типа ММВ, изготовляемого одним из заводов электротехнической промышленности.

При работе с таким мостом следует сначала устанавливать сопротивление сравнительного плеча равным

предполагаемому значению искомого сопротивления, а затем поворотом движка менять плечи отношения до установки стрелки гальванометра на нулевое деление шкалы. Точность измерения не превышает $\pm 2\%$.

Если в схеме моста рис. 9-23 сопротивления r_1 , r_2 , r_4 , r_3 и напряжение источника питания U будут неизменными, то ток в цепи гальванометра будет зависеть только

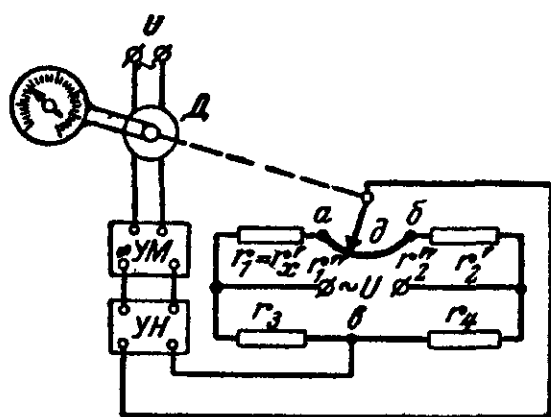


Рис. 9-28. Схема моста с автоматическим уравниванием.

от искомого сопротивления r_x . Это дает возможность на шкале гальванометра нанести деления, дающие значения искомого сопротивления или величины, функционально связанной с ним, например температуры.

Мосты, дающие возможность определять измеряемую величину по показаниям прибора, включенного в диагональ моста, называются неуравновешенными.

Неуравновешенные мосты широко применяются для измерения неэлектрических величин, в частности температуры.

Мосты, например, рассмотренные в начале § 9-10 (рис. 9-23), требующие для определения искомого сопротивления установления в гальванометре тока, равного нулю, что имеет место при выполнении условия

$$r_1 r_4 = r_2 r_3,$$

называются уравниваемыми мостами.

Уравнивание моста производится вручную или автоматически.

Схема моста с автоматическим уравниванием дана на рис. 9-28.

Два плеча моста r_3 и r_4 неизменны. Два других плеча $r_1 = r'_1 + r''_1$, $r_2 = r'_2 + r''_2$ изменяются при вращении движка d . Плечо r_1 состоит из измеряемого сопротивления $r_x = r'_1$ и сопротивления части калиброванной проволоки $ad - r''_1$. Плечо r_2 состоит из неизменного сопротивления r'_2 и сопротивления второй части калиброванной проволоки $db - r''_2$. Питание моста производится от источника с переменным напряжением, включенного

в одну диагональ моста. В другую диагональ ($вд$) через усилитель напряжения $УН$ и усилитель мощности $УМ$ включен реверсивный асинхронный двигатель $Д$, который перемещает движок $д$. В мостах для автоматического контроля управления или регулирования тот же двигатель приводит в действие контактные или регулирующие устройства.

Если мост уравновешен, то напряжение между точками $вд$ равно нулю, и двигатель неподвижен. При $r_1 < < \frac{r_2 r_3}{r_4}$ между точками $вд$ будет напряжение, имеющее определенную фазу. При $r_1 > \frac{r_2 r_3}{r_4}$ напряжение $U_{вд}$ будет иметь противоположную фазу. Это напряжение после усиления подается на двигатель, вызывая его вращение в ту или иную сторону в зависимости от фазы напряжения. Вращение двигателя происходит до тех пор, пока движок $д$ не будет установлен двигателем в положение, соответствующее равновесию в мосте. Тот же двигатель производит установку стрелки указателя, проградуированного в значениях измеряемой величины, например температуры.

Точность таких мостов $\pm 1\%$.

9-11. ИЗМЕРЕНИЕ МАЛЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВОЙНЫМ МОСТОМ

Двойной мост для измерения малых сопротивлений (рис. 9-29) имеет следующее устройство: толстая калиброванная манганиновая проволока $дз$ соединяется проводом $гд$ с измеряемым сопротивлением r_x . К точкам $аз$ присоединяются аккумулятор, амперметр, реостат, рубильник. К точкам $бж$ присоединяются два последовательно соединенных магазина сопротивлений r_1 и r_2 , а к точкам $ве$ — два последовательно соединенных магазина r'_1 и

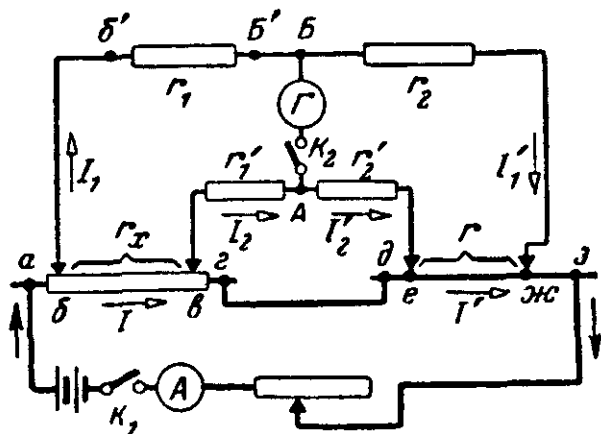


Рис. 9-29. Схема двойного моста.

r'_2 . К точкам AB присоединяется гальванометр. После сборки схемы подвижный контакт $ж$ устанавливают в положение, при котором сопротивление r будет равно предполагаемому значению искомого сопротивления r_x , и включают сопротивления в магазинах $r_1=r'_1 \geq 10$ ом и $r_2=r'_2 \geq 10$ ом. Затем, замкнув рубильник K_1 , устанавливают реостатом ток в цепи батареи порядка нескольких ампер, а при очень малых значениях искомого сопротивления — нескольких десятков ампер.

Далее замыкают рубильник K_2 в цепи гальванометра и перемещением подвижного контакта $ж$ устанавливают стрелку гальванометра на нуль шкалы. В случае невозможности установить стрелку гальванометра на нуль шкалы следует изменить отношение сопротивлений $\frac{r_1}{r_2}$ и $\frac{r'_1}{r'_2}$, сохраняя равенства $r_1=r'_1$ и $r_2=r'_2$, учитывая, что каждое из этих сопротивлений должно быть не меньше 10 ом. При токе в гальванометре, равном нулю,

$$I_1=I'_1; I_2=I'_2; I=I' \text{ и } \varphi_A=\varphi_B.$$

Применяя второй закон Кирхгофа к контурам $bb'B'BAвб$ и $eABже$, получаем:

$$I_1 r_1 = I r_x + I_2 r'_1 \text{ или } I r_x = I_1 r_1 - I_2 r'_1 = (I_1 - I_2) r_1;$$

$$I'_1 r_2 = I' r + I'_2 r'_2 \text{ или } I' r = I'_1 r_2 - I'_2 r'_2 = (I'_1 - I'_2) r_2.$$

Поделив почленно два последних уравнения и сокращая токи, получим:

$$\frac{r_x}{r} = \frac{r_1}{r_2},$$

откуда определяется искомое сопротивление

$$r_x = r \frac{r_1}{r_2}. \quad (9-25)$$

Теперь покажем, что переходные сопротивления и сопротивления соединительных проводов не оказывают существенного влияния на результат измерения. Проследим, как проходят токи в схеме (рис. 9-29).

Ток от аккумулятора, дойдя до точки $б$, делится на две части I и I_1 . Ток I в этой точке не встречает пере-

ходного сопротивления, так как он продолжает проходить по тому же проводу ag . Ток I_1 , идущий в сопротивление r_1 , встречает переходное сопротивление в точках $bb'B'B$, а также сопротивления соединительных проводов bb' и $B'B$.

Эти сопротивления соединены последовательно с сопротивлением r_1 и, следовательно, увеличивают сопро-

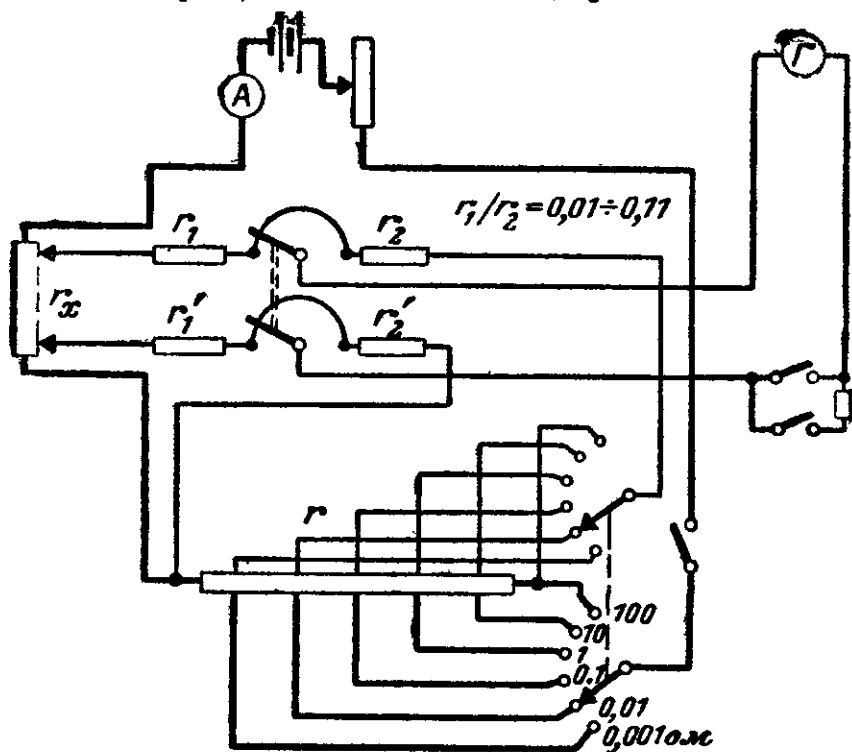


Рис 9-30 Схема двойного моста типа МТ5.

тивление этого плеча моста, но при выполнении условия $r_1 \geq 10$ ом погрешность, вносимая ими, будет ничтожно мала. То же можно сказать и об остальных плечах отношения r_2 , r'_1 и r'_2 .

В отношении переходных сопротивлений в точках a , g , d , z можно сказать, что они лежат за пределами сопротивлений r_x и r (сопротивление r_x ограничено потенциальными зажимами $бв$, а сопротивление r — зажимами $еж$) и, следовательно, не могут влиять на результат измерения. Таким образом, в двойном мосте устранено влияние на результат измерений переходных сопротивлений и сопротивлений соединительных проводов.

На рис. 9-30 дана схема двойного моста типа МТ-5, выпускаемого одним из заводов электротехнической промышленности. В этом мосте плечо сравнения r выполнено катушками сопротивлений, токовые и потенциаль-

ные зажимы которых могут переключаться поворотом одной рукоятки моста. Сравнительные плечи (r_1 , r_2 и r'_1 , r'_2) создаются участками двух реохордов (и последовательно соединенными с ними сопротивлениями), подвижные контакты которых перемещаются поворотом второй рукоятки моста. Пределы измерения моста $1 \cdot 10^{-6} \div 11$ ом.

Наряду с разными конструкциями одинарных и двойных мостов наша промышленность выпускает также

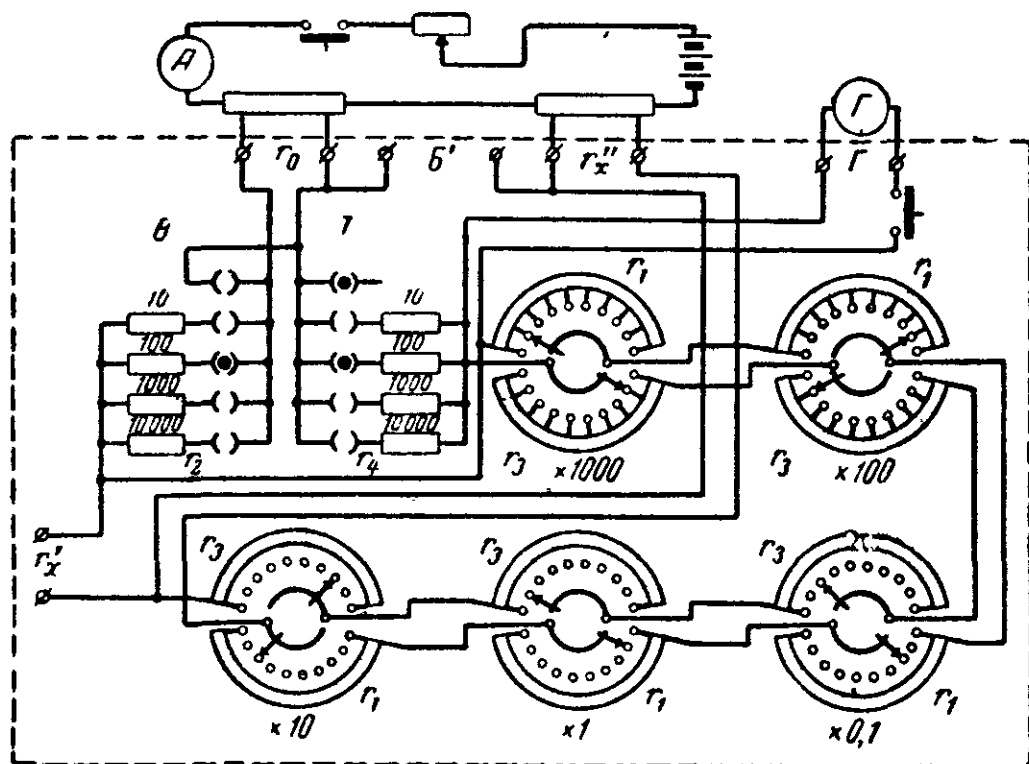


Рис 9-31. Схема комбинированного моста типа МТВ

комбинированные мосты, которые могут работать по схеме как одинарного, так и двойного моста; к таким относится, например, мост типа МТВ.

На рис. 9-31 дана схема моста типа МТВ. Часть схемы, расположенная за пределами пунктирного прямоугольника, состоящая из образцовой катушки r_0 , измеряемого сопротивления r_x , источника питания, реостата, амперметра и гальванометра, присоединяется к мосту при использовании его в качестве двойного моста.

Каждое из плеч моста r_1 и r_3 (соответствуют r_1 и r'_1 на рис. 9-29) выполнено в виде магазина сопротивления с пятью декадами, катушки которых соответственно имеют значения 0,1; 1; 10; 100 и 1 000 ом. Рукоятки этих

магазинов связаны механически и обеспечивают выполнение условия $r_1 = r_3$.

Каждое из плеч моста r_2 и r_4 (соответствуют r_2 и r'_2 на рис. 9-29) выполнено в виде штепсельного магазина с четырьмя катушками 10, 100, 1 000 и 10 000 ом.

При равновесии моста

$$r_x = r_0 \frac{r_1}{r_2}.$$

При использовании моста в качестве одинарного измеряемое сопротивление присоединяется к зажимам r'_x (XB), источник питания — к зажимам B' (BB), гальванометр — к зажимам Г. Штепсельное гнездо В замыкается. Плечо r_1 становится плечом сравнения, а плечи r_2 и r_4 — плечами отношения.

При равновесии моста

$$r_x = r_1 \frac{r_2}{r_4}.$$

Класс точности моста 0,05.

В. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УСТАНОВОК И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

9-12. ЗАМЕЧАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К МЕТОДАМ ИЗМЕРЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УСТАНОВОК

Каждая единица длины электрической сети имеет некоторое конечное сопротивление изоляции; поэтому при наличии в сети напряжения через сопротивление изоляции будут проходить токи, называемые иногда токами утечки. Эти токи могут проходить двумя путями: от провода, имеющего более высокий потенциал, непосредственно к проводу, имеющему низший потенциал, и от провода, имеющего более высокий потенциал, на землю и от земли к проводу, имеющему низший потенциал. Схема прохождения этих токов дана на рис. 9-32. Таким образом, можно рассматривать каждую единицу длины сети, как обладающую сопротивлением изоляции между проводами и между каждым из проводов и землей.

Каждая сеть или часть ее может рассматриваться состоящей из ряда последовательно соединенных уча-

стков единичной длины, а сопротивление изоляции ее — как состоящее из ряда параллельно соединенных между собой сопротивлений изоляции единичных участков этой сети.

Всякая электрическая сеть или часть ее может быть представлена эквивалентной схемой, в которой между

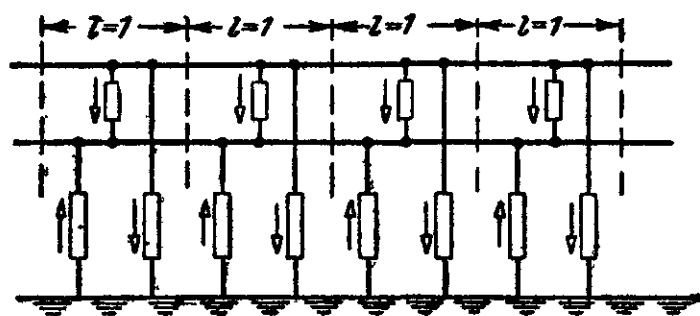


Рис. 9-32. Схема прохождения токов утечки двухпроводной линии.

проводами и между проводами и землей включены сосредоточенные сопротивления, эквивалентные сопротивлениям единичных участков (сопротивлениям, равномерно распределенным по сети). Изоляция установки легко подвергается изменению; поэтому за состоянием изоляции установки, за величиной сопротивления изоляции необходимо следить в течение всего срока работы установки.

Обычно величина сопротивления изоляции установки проверяется перед началом эксплуатации установки, после каждого расширения ее и периодически в течение всего срока эксплуатации установки.

Электротехнические правила и нормы СССР требуют:

а) испытание сопротивления изоляции установок производить или под рабочим напряжением, или во всяком случае под напряжением не меньше 100 в;

б) при измерении сопротивления изоляции определять сопротивление изоляции не только между проводами и землей, но также и между каждыми двумя проводами разного потенциала; при этом все лампы, электродвигатели и прочие приемники, а также трансформаторы должны быть отделены от проводов, а вся арматура должна быть, наоборот, присоединена, все предохранители вставлены, а выключатели замкнуты;

в) при условиях, указанных в пп. «а» и «б», величина сопротивления изоляции на любом участке между,

двумя предохранителями или за последним предохранителем должна быть не менее 1 000 ом, умноженных на число вольт рабочего напряжения (например, 120 000 ом при 120 в рабочего напряжения); эти нормы сопротивления изоляции не относятся к машинам, трансформаторам и аккумуляторам.

Воздушные провода, наружные устройства и части устройства, расположенные в сырых помещениях, могут не удовлетворять требованиям п. «в».

Сопротивление изоляции электрических машин при температуре, близкой к рабочей, должно быть не ниже значения, полученного по формуле

$$r = \frac{U}{1\,000 + \frac{S}{100}},$$

где r — изоляция машины, *Мом*;

U — номинальное напряжение машины, *в*;

S — номинальная мощность машины, *квa*.

Правила технической эксплуатации электростанций и электрических сетей требуют, чтобы сопротивление изоляции обмоток электродвигателей было не ниже 1 *Мом* на 1 *кв* рабочего напряжения для обмоток статора и 0,5 *Мом* для обмоток ротора.

При измерении изоляции могут иметь место два случая:

1) установка (сеть) не находится под рабочим напряжением;

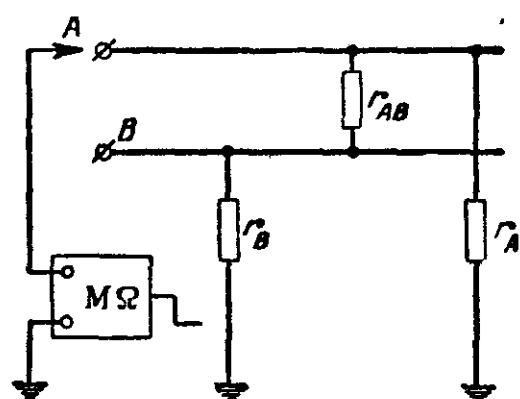
2) установка (сеть) находится под рабочим напряжением.

9-13. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УСТАНОВКИ, НЕ НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Если установка не находится под рабочим напряжением, то для измерения сопротивления ее изоляции применяют мегомметр (см. § 9-3).

На рис. 9-33а дана схема присоединения мегомметра для измерения сопротивления изоляции провода *A* двухпроводной установки относительно земли. Один зажим мегомметра присоединен к проводу *A*, другой зажим — к земле. Приемники энергии предполагаются отсоединенными (на рис. 9-33а не показаны).

Как видно из схемы, результат измерения определит не сопротивление изоляции провода A относительно земли r_A , а эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей, одной ветви — r_A и второй, состоящей из двух последовательно соединенных сопротивлений, — r_{AB} и r_B . Это найденное эквивалентное сопротивление $r_{\Sigma A}$



а)

Рис. 9-33а. Эквивалентная схема двухпроводной сети и схема измерения сопротивления изоляции одного из проводов относительно земли.

при всех возможных значениях сопротивлений r_{AB} и r_B будет или меньше сопротивления r_A , или равно ему ($r_{\Sigma A} \geq r_A$).

Не имея возможности по найденному значению определить величину r_A , мы можем все же утверждать, что величина r_A не может быть меньше найденного значения $r_{\Sigma A}$.

Измеряя аналогично предыдущему сопротивление между проводом B и землей, а также между проводами A и B , мы можем определить

те значения, меньше которых не могут быть сопротивления r_B и r_{AB} .

На рис. 9-33 б дана схема соединения мегомметра для измерения сопротивления изоляции провода A трех-

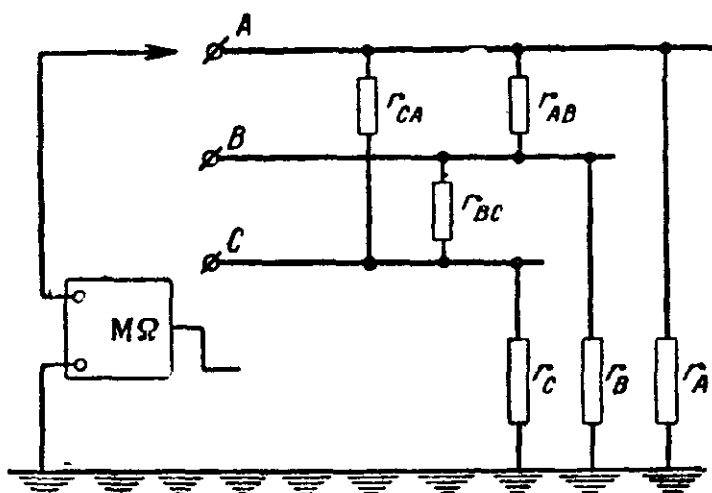


Рис. 9-33б. Эквивалентная схема трехпроводной сети и схема измерения сопротивления изоляции одного из проводов относительно земли.

проводной (трехфазной) установки относительно земли. Один зажим мегомметра присоединен к проводу A , а второй — к земле.

На рис. 9-34 дана та же схема, только в более удобочитаемом виде. Из схемы видно, что в этом случае будет измерено эквивалентное сопротивление $r_{\Sigma A}$ двух параллельных ветвей: r_A и второй, образованной сочета-

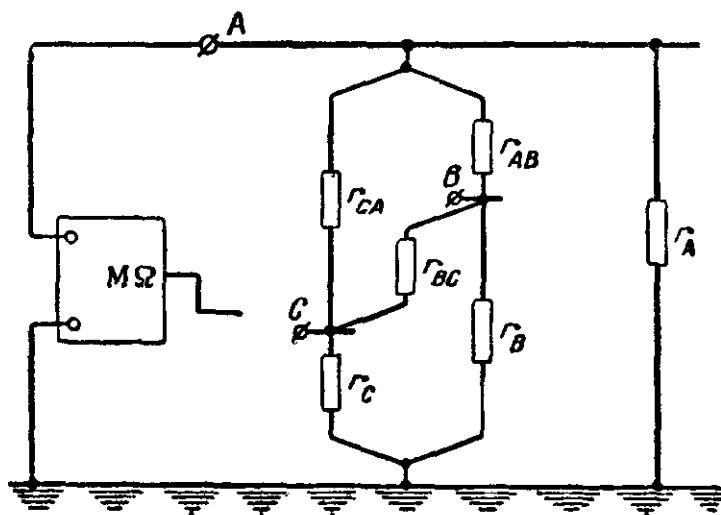


Рис 9-34. Схема измерения сопротивления изоляции одного из проводов трехпроводной линии относительно земли.

нием из пяти сопротивлений. Это найденное эквивалентное сопротивление $r_{\Sigma A}$ при всех возможных значениях пяти сопротивлений, образующих вторую параллельную ветвь, будет или меньше сопротивления r_A , или равно ему.

Измеряя аналогично предыдущему сопротивление между проводом B и землей, между проводом C и землей, а также между проводами AB , BC и CA , мы можем определить те значения, меньше которых не могут быть сопротивления r_B , r_C , r_{AB} , r_{BC} и r_{CA} .

Если бы при измерении сопротивлений изоляции приемники энергии остались присоединенными, то они шунтировали бы сопротивления изоляции r_{AB} , r_{BC} и r_{CA} между проводами (рис. 9-35), и их определение было бы невозможно. При включенных приемниках энергии три провода трехпроводной установки оказываются соединенными между собой малыми по сравнению с сопротивлением изоляции сопротивлениями приемников, и, следовательно, сопротивления изоляции проводов A , B

и С относительно земли будут соединены между собой параллельно (рис. 9-36).

Следовательно, при включенных приемниках энергии имеет смысл производить измерение сопротивления изоляции лишь между одним из проводов и землей; при этом результат измерения будет

$$r = \frac{r_A r_B r_C}{r_A r_B + r_B r_C + r_C r_A}.$$

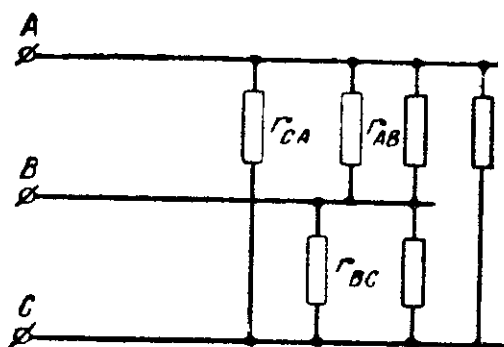


Рис. 9-35. Схема трехпроводной линии с присоединенными приемниками энергии.

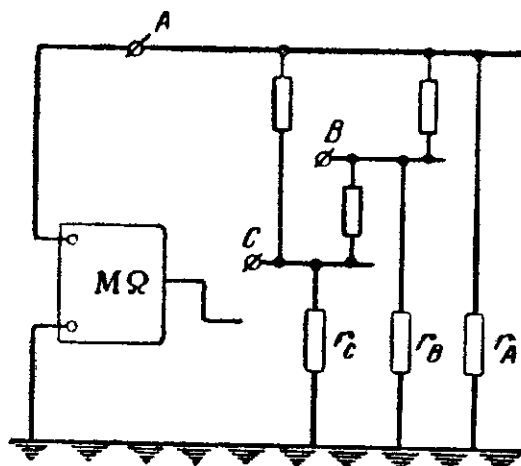


Рис. 9-36. Схема измерения сопротивления изоляции трехпроводной линии относительно земли.

Если результат измерения будет удовлетворять требованиям Правил, то тем более этим требованиям будет удовлетворять результат измерений при отсоединенных приемниках энергии.

9-14. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ УСТАНОВКИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ ПОД РАБОЧИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Если сеть (установка) находится под рабочим напряжением, то сопротивление ее изоляции можно определить, пользуясь вольтметром (рис. 9-37).

Для измерения изоляции определяем:

- 1) рабочее напряжение сети U ;
- 2) напряжение между проводом А и землей U_A (показание вольтметра при положении А переключателя);
- 3) напряжение между проводом В и землей U_B (показание вольтметра при положении В переключателя).

Подключив вольтметр к проводу A и обозначив r_V — сопротивление вольтметра, r_{xA} и r_{xB} — сопротивления изоляции проводов A и B относительно земли, можем написать выражение тока, идущего через изоляцию провода B :

$$I_1 = \frac{U - U_A}{r_{xB}} = \frac{U}{\frac{r_{xA}r_V}{r_{xA} + r_V} + r_{xB}}. \quad (9-26)$$

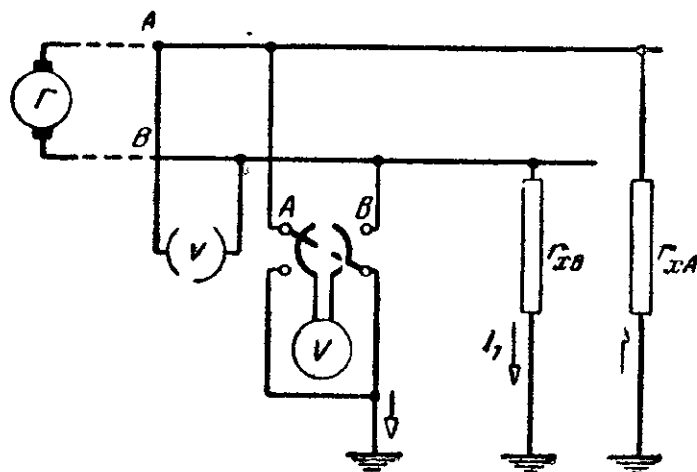


Рис. 9-37. Схема измерения сопротивления изоляции двухпроводной сети вольтметром.

Подключив вольтметр к проводу B , можем написать выражение для тока, идущего через изоляцию провода A :

$$I_2 = \frac{U - U_B}{r_{xA}} = \frac{U}{\frac{r_{xB}r_V}{r_{xB} + r_V} + r_{xA}}. \quad (9-27)$$

Решая совместно два полученных уравнения относительно r_{xA} и r_{xB} , найдем сопротивление изоляции провода A относительно земли:

$$r_{xA} = r_V \frac{U - U_A - U_B}{U_B} \quad (9-28)$$

и сопротивление изоляции провода B относительно земли:

$$r_{xB} = r_V \frac{U - U_A - U_B}{U_A}. \quad (9-29)$$

Замечая показания вольтметров при их включении и подставив эти показания в приведенные формулы, най-

дем значения сопротивления изоляции каждого из проводов относительно земли.

Если сопротивление изоляции провода A относительно земли велико по сравнению с сопротивлением вольтметра, то при положении A переключателя вольтметр будет соединен последовательно с сопротивлением изоляции r_{xB} , величину которого в этом случае можно определить по формуле (9-12):

$$r_{xB} = r_V \left(\frac{U}{U_A} - 1 \right). \quad (9-30)$$

Аналогично, если сопротивление r_{xB} велико по сравнению с сопротивлением вольтметра, то при положении B переключателя вольтметр будет соединен последовательно с сопротивлением изоляции r_{xA} , величина которого

$$r_{xA} = r_V \left(\frac{U}{U_B} - 1 \right). \quad (9-31)$$

Из выражений (9-30) и (9-31) видно, что показания вольтметра, включенного между одним проводом и землей, при постоянном напряжении сети U зависят только от сопротивления изоляции второго провода. Поэтому вольтметр может быть проградуирован в омах, и по показанию его можно непосредственно судить о величине сопротивления изоляции сети. Такие вольтметры, градуированные в омах, также называются омметрами.

Для контроля за состоянием изоляции вместо одного вольтметра с переключателем можно применить два вольтметра, включая их по схеме, показанной на рис. 9-38. В этом случае при нормальном состоянии изоляции каждый из вольтметров будет показывать напряжение, равное половине напряжения сети.

Если же сопротивление изоляции одного из проводов будет уменьшаться, то напряжение на вольтметре, включенном в этот провод, будет падать, а на втором вольтметре — повышаться, так как эквивалентное сопротивление между зажимами первого вольтметра уменьшается, а напряжение сети распределяется пропорционально сопротивлениям.

В сетях трехфазного тока контроль за состоянием изоляции производится также при помощи вольтметров, включаемых между проводами и землей (рис. 9-39),

Если изоляция всех проводов трехфазной цепи одинакова, то каждый из вольтметров показывает фазное напряжение. Если же сопротивление изоляции одного из проводов, например первого, начнет уменьшаться, то будет уменьшаться и показание вольтметра, подключенного к этому проводу, так как разность потенциалов между этим проводом и землей будет уменьшаться. Одновременно показания двух других вольтметров будут увеличиваться. В пределе, если сопротивление изоляции

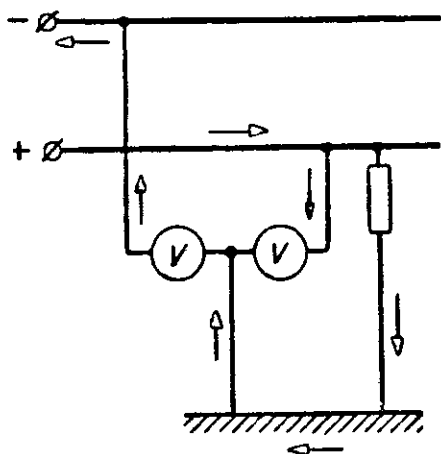


Рис. 9-38. Схема для контроля за состоянием изоляции двухпроводной сети.

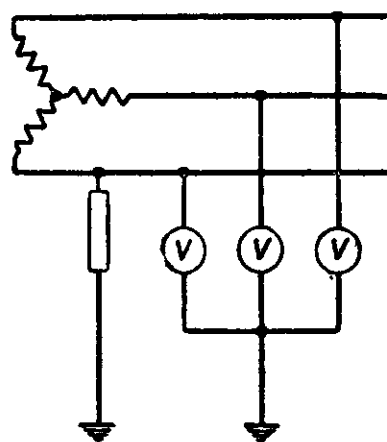


Рис. 9-39. Схема для контроля за состоянием изоляции трехфазной сети.

первого провода упадет до нуля, то разность потенциалов между этим проводом и землей также будет равна нулю, и первый вольтметр даст нулевое показание. Одновременно разность потенциалов между вторым проводом и землей, а также между третьим проводом и землей возрастет до линейного напряжения, что и отметят своими показаниями второй и третий вольтметры.

Для контроля за состоянием изоляции в высоковольтных цепях трехфазного тока с незаземленной нейтралью применяют или три электростатических вольтметра, включаемых непосредственно между проводами и землей (рис. 9-39), или три трансформатора напряжения, соединенных звездой (рис. 9-40), или пятистержневые трансформаторы напряжения (рис. 9-41). Обычно трехстержневые трансформаторы напряжения для контроля за состоянием изоляции непригодны. Действительно, при заземлении одной из фаз установки первичная обмотка этой фазы трансформатора напряжения ока-

жется замкнутой накоротко (рис. 9-40), в то время как две другие обмотки окажутся под линейными напряжениями. Вследствие этого магнитные потоки в сердечниках этих двух фаз сильно возрастут и замкнутся через сердечник закороченной фазы и через кожух трансформатора. Этот магнитный поток будет наводить в короткозамкнутой обмотке значительный ток, который может

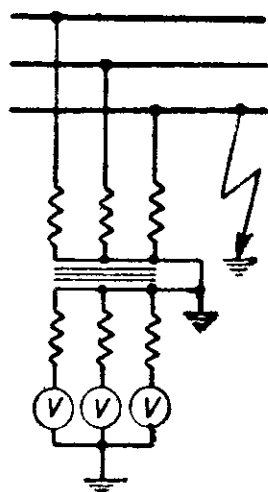


Рис 9-40 Схема для контроля за состоянием изоляции трехфазной высоковольтной сети

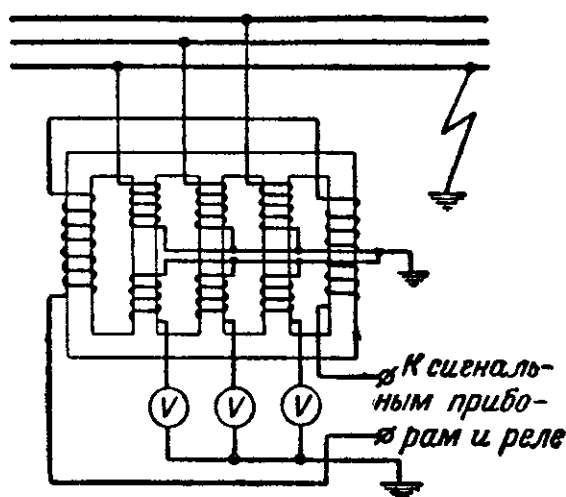


Рис 9-41 Схема устройства и включения пятистержневого трансформатора напряжения

вызвать перегрев и повреждение трансформатора.

В пятистержневом трансформаторе при замыкании одной из фаз установки на землю магнитные потоки двух других фаз трансформатора замкнутся через дополнительные стержни трансформатора, не вызывая перегрева трансформатора.

Дополнительные стержни обычно имеют обмотки, к которым присоединяются реле и сигнальные приборы, приходящие в действие при замыкании одной из фаз установки на землю, так как появляющиеся в этом случае в дополнительных стержнях магнитные потоки наводят в обмотках этих стержней э. д. с.

9-15. ЗАМЕЧАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ ЛИНИИ

При повреждении изоляции в кабельной линии весьма важно уметь определить место этого повреждения, для того чтобы можно было по возможности быстро

устранить повреждение. Повреждения в кабелях могут быть разделены на следующие группы:

- а) пробой изоляции кабеля между жилой и броней;
- б) пробой изоляции кабеля между жилами;
- в) обрыв жилы кабеля;
- г) сложные повреждения, представляющие собой комбинации трех перечисленных групп повреждений.

Для определения места повреждения изоляции кабеля применяются различные методы. Одним из распространенных является метод петли. Он дает возможность определить место повреждения изоляции в том случае, если произошел пробой между жилой кабеля и броней или между двумя жилами в трехжильном кабеле. Необходимой предпосылкой для точного определения места повреждения является малое сопротивление места пробоя (не больше 1 000 ом).

Если это сопротивление велико, то его можно уменьшать прожиганием или же производить измерение при высоком напряжении.

Прожечь поврежденный кабель — значит уменьшить сопротивление изоляции его в месте повреждения. Это понижение сопротивления достигается обугливанием изоляции при прохождении тока через поврежденное место изоляции. Для прожигания применяются постоянный и переменный токи высокого напряжения.

9-16. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ МЕТОДОМ ПЕТЛИ

Метод петли из жил кабеля (метод Муррея) представляет собой применение схемы одинарного моста (рис. 9-42).

Для определения места повреждения — пробой между жилой и броней или землей, концы bb' исправной и поврежденной жил кабеля закорачиваются. К двум другим концам aa' подключают гальванометр и магазины сопротивлений R и r_A . Магазины сопротивлений, как и в реохордном мосте, можно заменить калиброванной проволокой, которая подвижным контактом делится на две части. Зажим, к которому присоединены магазины сопротивлений, через батарею элементов соединяется с землей.

Обозначим сопротивление одной жилы кабеля через r , сопротивление участка кабеля между точкой повреждения и концом a' — через r_x . При нулевом поло-

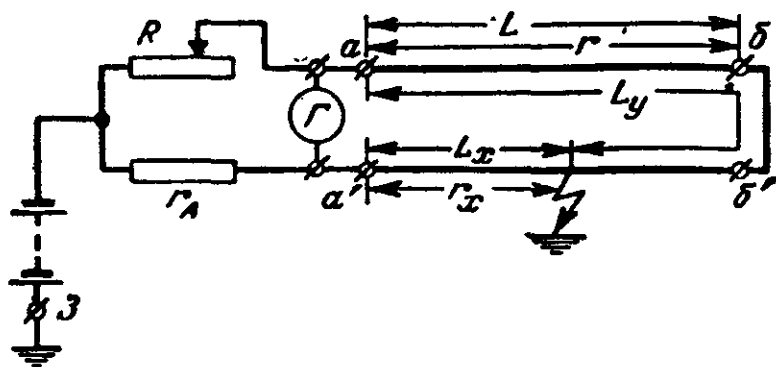


Рис. 9-42. Схема для определения места повреждения изоляции кабеля методом петли.

жении стрелки гальванометра, как и для одинарного моста, можно написать:

$$Rr_x = r_A(2r - r_x),$$

откуда

$$r_x = 2r \frac{r_A}{R + r_A}. \quad (9-32)$$

Определив r_x , зная удельное сопротивление материала жил кабеля ρ и сечение жил кабеля S , по формуле $L_x = r_x \frac{S}{\rho}$ можно определить расстояние L_x от конца кабеля a' до точки повреждения изоляции.

Если сечение кабеля по всей длине одинаково, то в формулу для определения r_x можно вместо r_x и r подставить их выражения через длину, сечение и удельное сопротивление, тогда получим

$$\rho \frac{L_x}{S} = 2\rho \frac{L}{S} \frac{r_A}{R + r_A},$$

откуда

$$L_x = 2L \frac{r_A}{R + r_A}. \quad (9-33)$$

По последней формуле обычно и определяется расстояние от конца кабеля до места повреждения.

Для проверки результата измерения целесообразно произвести второе аналогичное измерение, поменяв местами концы кабеля a и a' . В этом случае расстояние L_y определится по формуле

$$L_y = 2L \frac{r'_A}{R' + r_A},$$

где R' и r'_A — значения сопротивлений плеч моста при втором измерении.

При правильном измерении должно удовлетворяться равенство

$$L_x + L_y = 2L.$$

Сопротивление соединительного провода bb' , переходные сопротивления в точках bb' и сопротивления проводов, соединяющих концы кабеля с магазинами сопротивлений, должны быть малы; в противном случае неизбежны значительные погрешности при измерении.

Для определения места повреждения изоляции кабеля методом петли можно применить мост типа УМВ (см. § 9-10) или кабельный мост типа КМ Краснодарского завода.

Г. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЙ

9-17. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ЗАЗЕМЛЕНИЮ

Заземлением называется преднамеренное электрическое соединение какой-либо части установки с заземлителем.

Заземлителем или заземляющим электродом называется один или несколько металлических проводников, находящихся в непосредственном соприкосновении с почвой и имеющих назначение создать электрическое соединение с землей.

Заземляющими проводами называются проводники, соединяющие заземляемые части электрической установки с заземлителем.

Заземляющим устройством (заземлением) называется совокупность заземлителя и заземляющих проводов.

Заземляющее устройство обладает сопротивлением. Сопротивление заземления состоит из сопротивления, которое оказывает земля проходящему току (сопротивление растеканию), сопротивления заземляющих проводов и сопротивления самого заземлителя. Со-

противления заземляющих проводов и заземлителя обычно бывают малыми по сравнению с сопротивлением растеканию и ими во многих случаях можно пренебречь, считая сопротивление заземления равным сопротивлению растекания.

Величина сопротивления заземления не должна повышаться более некоторой определенной для каждой установки величины, так как в противном случае обслуживание установки может сделаться небезопасным или сама установка может оказаться в условиях, на работу при которых она не рассчитана. С другой стороны,

сопротивление заземления может сильно меняться от различных причин, как, например, от состояния погоды (дождь или сухая погода), времени года и т. п. Поэтому важно периодически измерять величину сопротивления заземления.

Если к двум электродам (одиночным трубам), расположенным в земле на большом расстоянии (несколько десятков метров), приложить напряжение U , то через электроды и землю пойдет ток I (рис. 9-43).

Если первый электрод (A) соединить с одним зажимом электростатического вольтметра, а второй зажим

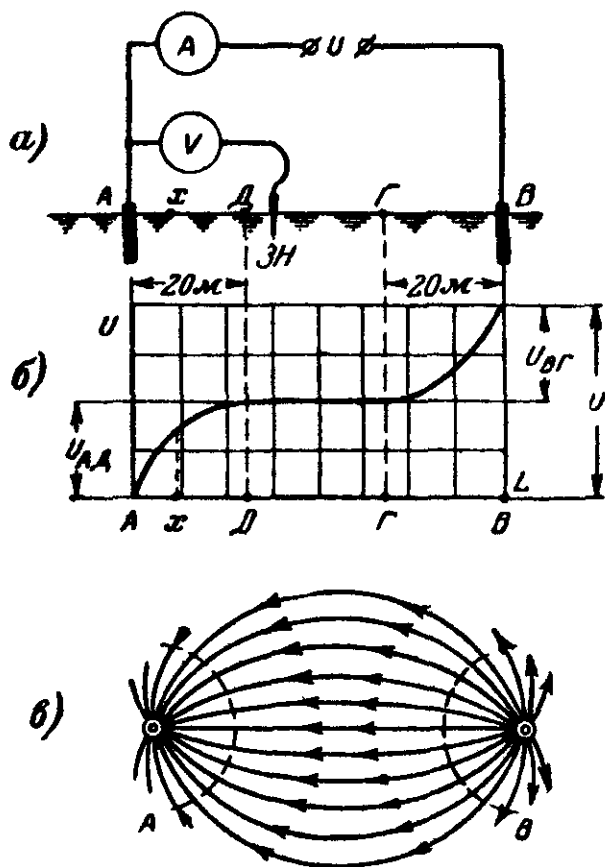


Рис. 9-43. Распределение потенциалов между двумя электродами на поверхности земли.

a — схема для нахождения распределения потенциалов; b — кривая падения напряжения; $в$ — схема прохождения токов.

его при помощи железного стержня — зонда соединять с землей в разных точках, расположенных на прямой, соединяющей электроды, то можно получить кривую падения напряжения по линии, соединяющей электроды. Такая кривая дана на рис. 9-43,б. Из кривой видно, что вблизи первого электрода напряжение сначала растет быстро, затем медленнее и далее остается неизменным. При приближении ко второму электроду (В) напряжение начинает нарастать сначала медленно, а затем быстрее.

Такое распределение напряжения объясняется тем, что линии тока от первого электрода расходятся в разные стороны (рис. 9-43,в), ток растекается и, следовательно, по мере удаления от первого электрода ток проходит через все возрастающие сечения земли. Иначе говоря, по мере удаления от первого электрода плотность тока уменьшается, достигая на некотором расстоянии от него (для одиночной трубы на расстоянии около 20 м) настолько малых значений, что ее можно считать равной нулю. Вследствие этого на единицу длины пути тока земля оказывает току неодинаковое сопротивление: большее — вблизи электрода и все меньшее — по мере удаления от него. Это и приводит к тому, что падение напряжения на единицу пути по мере удаления от электрода уменьшается, достигая нулевого значения при удалении от одиночной трубы на расстояние, большее 20 м.

По мере же приближения ко второму электроду линии тока сходятся, поэтому увеличиваются сопротивление и падение напряжения на единицу пути тока.

На основании сказанного под сопротивлением растеканию первого электрода мы и будем понимать то сопротивление, которое встречает на своем пути ток во всем прилегающем к электроду слое земли (в зоне растекания тока), на котором наблюдается падение напряжения.

Следовательно, величина сопротивления первого заземления

$$r_A = \frac{U_{АД}}{I}.$$

Если на прилегающем ко второму электроду слое земли будет напряжение $U_{BГ}$, то сопротивление второго заземления

$$r_B = \frac{U_{BГ}}{I}.$$

Точки поверхности земли в зоне, в которой не наблюдается падения напряжения (зона ДГ, рис. 9-43), принято считать точками нулевого потенциала.

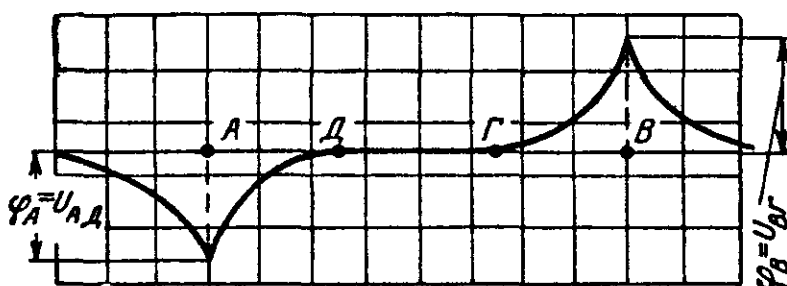


Рис. 9-44. Кривая распределения потенциалов на поверхности земли.

При этом условии потенциал φ_x любой точки x в зоне растекания тока будет численно равен напряжению между этой точкой и точкой нулевого потенциала, например точкой Д:

$$U_{xD} = \varphi_x - \varphi_D = \varphi_x - 0 = \varphi_x.$$

Согласно сказанному потенциалы электродов А и В, называемые полными потенциалами, равны:

$$\varphi_A = U_{AД} \text{ и } \varphi_B = U_{BГ}.$$

Кривая распределения потенциала на поверхности земли на линии, соединяющей электроды А и В, дана на рис. 9-44.

Форма этой кривой зависит не от тока, а от формы электродов и их расположения.

Кривая распределения потенциала дает возможность определить, под какой разностью потенциалов окажется человек, прикасающийся к двум точкам земли или к заземленной точке установки и какой-либо точке земли. Таким образом, эта кривая дает возможность судить, обеспечивает ли заземление безопасность людей, соприкасающихся с установкой. Согласно правилам эксплуатации электротехнических установок при испытаниях

заземляющих устройств следует не только измерять сопротивление заземления, но и снимать кривую распределения потенциала.

Пример 9-1. Определить, под каким напряжением (напряжение прикосновения) окажется человек, прикасающийся к масляному выключателю (рис. 9-45), если произойдет повреждение изолятора

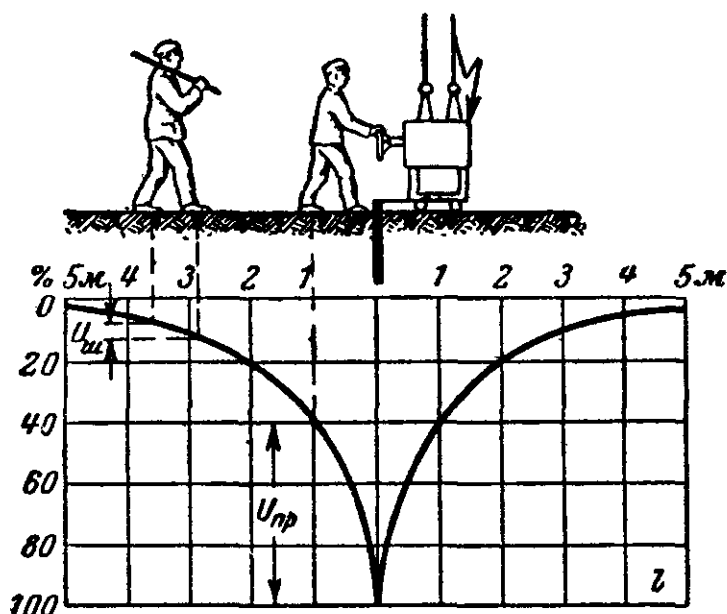


Рис. 9-45. Кривая распределения потенциалов и определение напряжения прикосновения.

выключателя и через заземление пойдет ток заземления $I_z = 50$ а при сопротивлении заземления $r_z = 5$ ом.

Полный потенциал заземления

$$\varphi_n = U_z = I_z r_z = 50 \cdot 5 = 250 \text{ в.}$$

Из кривой распределения потенциала видно, что между рукой и ногой человека будет разность потенциалов, составляющая 60% полного потенциала заземления; следовательно, напряжение прикосновения будет:

$$U_{пр} = 60\% U_z = \frac{60}{100} 250 = 150 \text{ в.}$$

Измерение сопротивления заземлений можно производить различными методами:

- 1) методом амперметра и вольтметра;
- 2) методом непосредственного отсчета при помощи специальных логометров;
- 3) методом компенсации;
- 4) мостовыми методами (одинарными мостами).

Во всех случаях измерений сопротивления заземления необходимо применять переменный ток, так как при применении постоянного тока в месте соприкосновения заземлителя с сырой землей будут возникать явления поляризации, сильно искажающие результат измерения.

9-18. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАЗЕМЛЕНИЙ МЕТОДОМ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Схема соединения для измерения этим методом дана на рис. 9-46.

Присоединим к испытуемому заземлителю *A* и вспомогательному заземлителю *B* вторичную обмотку силового трансформатора. Измерив ток при помощи амперметра и напряжение при помощи вольтметра, соединенного с испытуемым заземлителем и зондом, расположенным в зоне нулевого потенциала, определим сопротивление заземления:

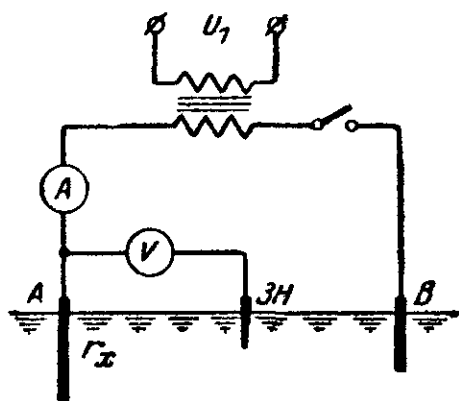


Рис. 9-46. Схема для измерения сопротивления заземления амперметром и вольтметром.

$$r_x = \frac{U}{I}.$$

При измерении этим методом необходим вольтметр, обладающий сопротивлением, значительно бóльшим сопротивления зонда. В противном случае будут иметь место значительные погрешности, так как вольтметр соединен последовательно с сопротивлением зонда (рис. 9-47).

Погрешность в измерении сопротивления, обусловленная сопротивлением зонда, имеет вид:

$$\gamma_r = \frac{r_{ЗН}}{r_V + r_{ЗН}} 100\%.$$

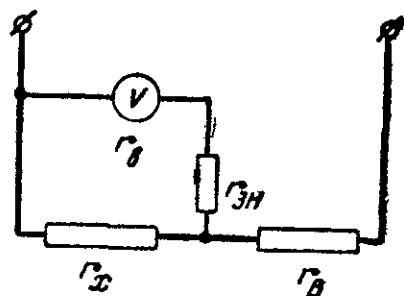


Рис. 9-47. Эквивалентная схема цепи, изображенной на рис. 9-46.

Для измерения наиболее подходящими являются вольтметры электростатической ламповой или детектор-ной системы.

Этот метод является наиболее распространенным при производстве ответственных испытаний и в особенности при измерении малых сопротивлений заземлений.

9-19. ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАЗЕМЛЕНИЙ ТИПА М1103 (КОМПЕНСАЦИОННЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ)

Прибор для измерения сопротивлений заземлений типа М1103 Киевского завода (рис. 9-48) состоит из источника питания переменного тока, трансформатора

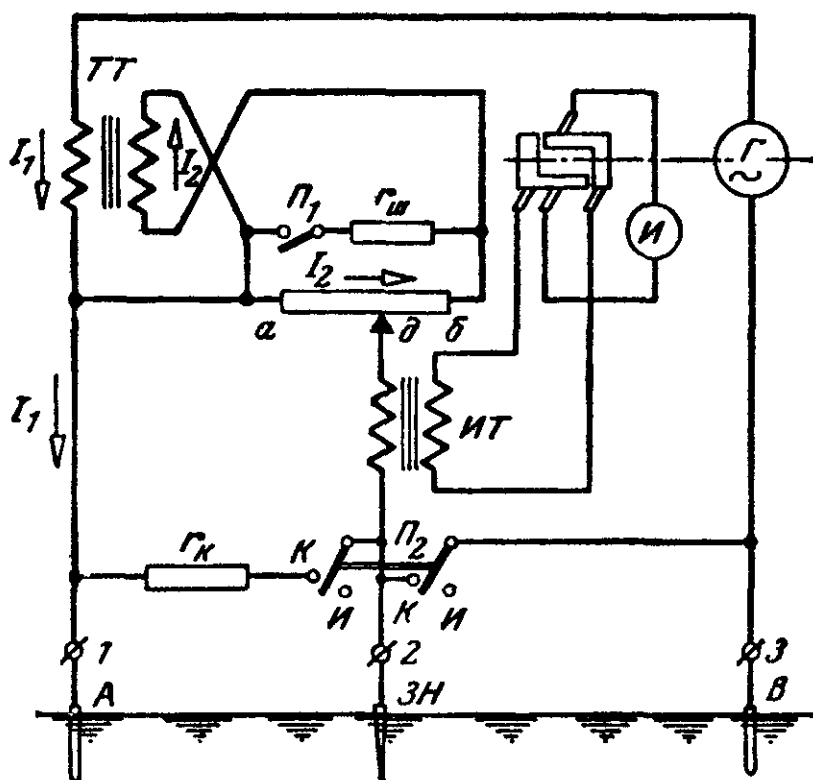


Рис. 9-48. Прибор для измерения сопротивления заземления типа М1103.

тока ТТ, вторичная обмотка которого замкнута на сопротивление $r_{аб}$, и измерительного механизма И магнитоэлектрической системы, который через механический выпрямитель присоединен к зажимам вторичной обмотки изолирующего трансформатора ИТ.

Для измерения сопротивления заземления прибор соединяется с испытуемым заземлителем А (зажим 1), вспомогательным заземлителем В (зажим 3) и зондом ЗН (зажим 2).

При вращении рукоятки прибора от источника питания ток I_1 будет проходить по первичной обмотке трансформатора тока, испытываемому заземлителю, земле и вспомогательному заземлителю.

При наличии тока в первичной обмотке трансформатора тока во вторичной цепи будет ток I_2 .

Ток I_1 создает на измеряемом сопротивлении падение напряжения $U_1 = I_1 r_x$. Ток I_2 создает на участке сопротивления ad падение напряжения $U_2 = I_2 r_{ad}$. Изменяя сопротивление r_{ad} перемещением движка d , можно добиться равенства $U_1 = U_2$ (момент компенсации), при котором ток, идущий по первичной обмотке изолирующего трансформатора, будет равен нулю, а следовательно, будут равны нулю как вторичный ток изолирующего трансформатора, так и угол отклонения подвижной части измерительного механизма.

В этом случае

$$I_1 r_x = I_2 r_{ad},$$

но так как

$$I_1 = I_2,$$

то

$$r_x = r_{ad}.$$

Таким образом, величина сопротивления заземления может быть отсчитана непосредственно на шкале прибора по положению движка d .

Изменение предела измерения с 10 до 50 *ом* достигается шунтированием сопротивления r_{ad} при помощи переключателя Π_1 .

Для проверки исправности прибора при отключенных заземлителях переключатель Π_2 становится в положение «контроль». При этом к зажимам 1—2 присоединяется сопротивление 10 *ом*, а зажимы 2—3 замыкаются накоротко. При вращении рукоятки прибора компенсация должна наступить при положении движка d , соответствующем включенному сопротивлению.

Номинальной скорости вращения рукоятки прибора 120 *об/мин* соответствует частота тока генератора 120—130 *гц*.

Прибором можно пользоваться также для измерений сопротивлений. Для этого зажимы 2 и 3, соединенные

вместе, присоединяются к одному зажиму измеряемого сопротивления, а второй зажим его присоединяют к зажиму 1. Процесс измерения тот же, что и при определении сопротивления заземления.

Наличие изолирующего трансформатора и механического выпрямителя делает показания прибора не зависящими от блуждающих токов. Высокая чувствительность измерительного механизма обеспечивает малое влияние на результат измерения сопротивления зонда.

9-20. ПРИБОР ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗАЗЕМЛЕНИЙ ТИПА МС-08

Прибор типа МС-08 завода «Энергоприбор» имеет принципиальную схему, показанную на рис. 9-49.

В этом приборе применен логометр магнитоэлектрической системы. Одна рамка логометра включается

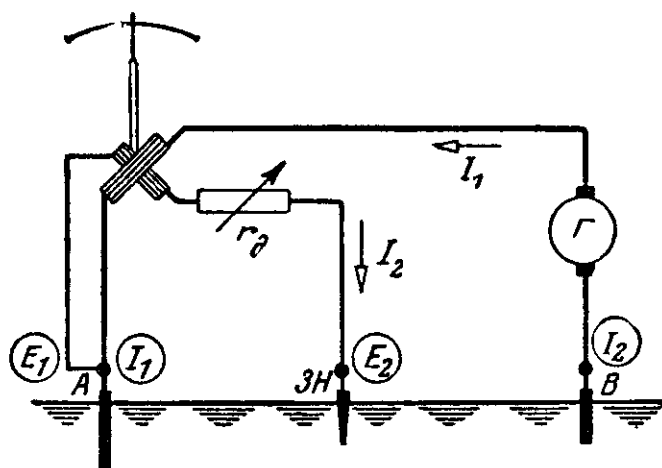


Рис. 9-49. Принципиальная схема прибора для измерения сопротивлений заземлений типа МС-08.

в цепь тока I_1 последовательно с источником питания, испытуемым заземлителем A и вспомогательным заземлителем B .

Вторая рамка логометра вместе с последовательно соединенным добавочным сопротивлением подключается к испытуемому заземлителю и зонду $ЗН$. Таким образом, при измерении цепь второй рамки находится под напряжением, равным падению напряжения на измеряемом сопротивлении, и, следовательно, ток этой рамки

$$I_2 = \frac{I_1 r_x}{r_2 + r_d + r_{ЗН}}.$$

Как известно из § 4-1, угол поворота подвижной части логометра

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{\frac{I_1}{I_2 r_x}}{\frac{r_2 + r_d + r_{3H}}{r_x}}\right) = \\ = F\left(\frac{r_2 + r_d + r_{3H}}{r_x}\right) = F\left(\frac{k}{r_x}\right),$$

где $k = r_2 + r_d + r_{3H}$ — сопротивление, при котором произведена градуировка шкалы прибора.

Таким образом, при постоянном значении k угол поворота подвижной части зависит только от измеряемого сопротивления.

Для того чтобы при различных сопротивлениях зонда r_{3H} сопротивление k оставалось неизменным, часть добавочного сопротивления r_d делается регулируемой. Регулировка добавочного сопротивления производится перед каждым измерением. Величину добавочного сопротивления регулируют до тех пор, пока стрелка прибора не установится на контрольной отметке, данной на шкале прибора.

Для измерения сопротивления заземления необходим переменный ток, а измерительный механизм магнитоэлектрической системы применим только для постоянного тока. Для того чтобы выполнить то и другое условия, прибор типа МС-08 снабжают электромеханическим преобразователем постоянного тока в переменный и механическим выпрямителем (рис. 9-50). Механический преобразователь включен в цепь тока, состоящую из источника питания постоянного тока, первой рамки логометра и земли, между измеряемым и вспомогательным заземлителями. В течение первой части оборота механического преобразователя ток в его цепи проходит в одном направлении. После этого преобразователь переключает часть цепи, состоящую из измеряемого заземлителя, земли и вспомогательного заземлителя, и по ней в течение второй части оборота преобразователя проходит ток обратного направления.

Таким образом, в земле проходит переменный ток и, следовательно, к двум щеткам механического выпрямителя, соединенным с землей, будет приложено перемен-

ное напряжение; на двух же других щетках этого выпрямителя будет выпрямленное напряжение, под которым и находится цепь второй рамки логометра, состоящая из самой рамки и добавочного сопротивления.

На рис. 9-50 участки цепи, по которым проходит переменный ток, показаны пунктирными линиями.

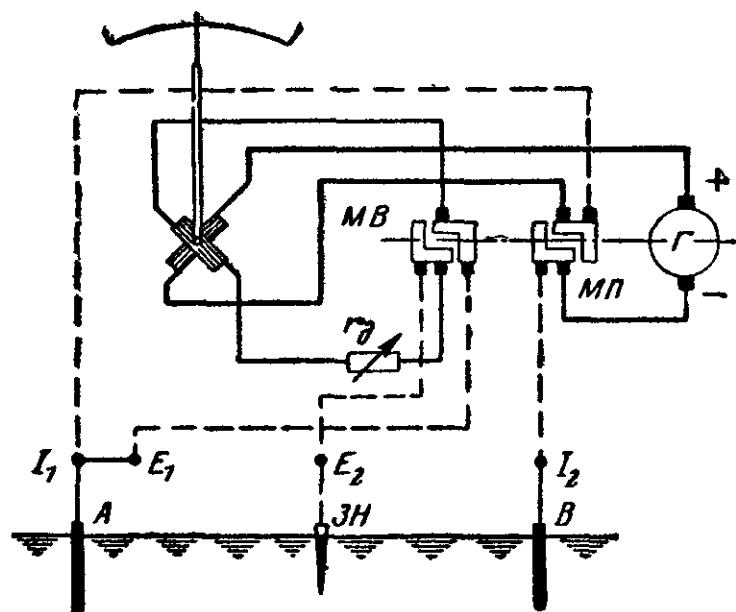


Рис. 9-50 Схема прибора типа МС-08.

Наличие механического преобразователя и выпрямителя делает показания этих приборов практически не зависящими от блуждающих токов, а наличие регулируемого добавочного сопротивления в цепи второй рамки дает возможность исключить влияние сопротивления зонда.

Прибор имеет три предела измерения: 10; 100 и 1 000 ом.

9-21. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ ОТДЕЛЬНЫХ ТОЧЕК ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ

Как уже отмечалось выше, согласно правилам эксплуатации электротехнических установок при испытаниях заземляющих устройств следует не только измерять сопротивление заземления, но и снимать кривую распределения потенциала вокруг заземлителей.

Потенциалы отдельных точек земли и ее поверхности можно определить, пользуясь вольтметром или прибором для измерения сопротивлений заземлений.

Схема для измерения потенциалов вокруг заземлителя A при помощи вольтметра дана на рис. 9-51.

Для измерения потенциала какой-либо точки x измеряют электростатическим вольтметром, соединенным с зондом, напряжение между испытуемым заземлителем

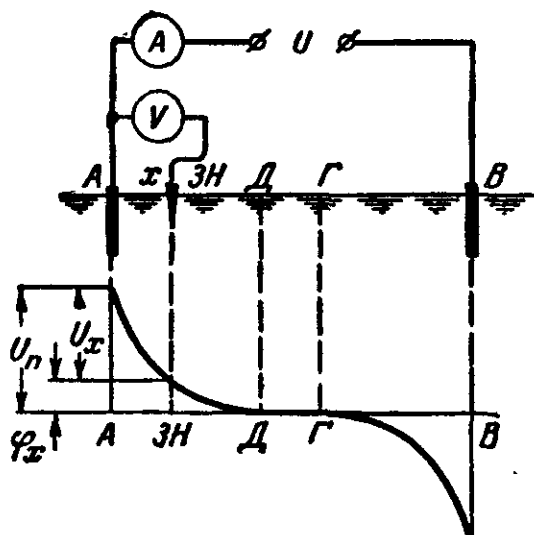


Рис. 9-51. Схема для измерения потенциалов при помощи вольтметра и кривая падения напряжения между электродами.

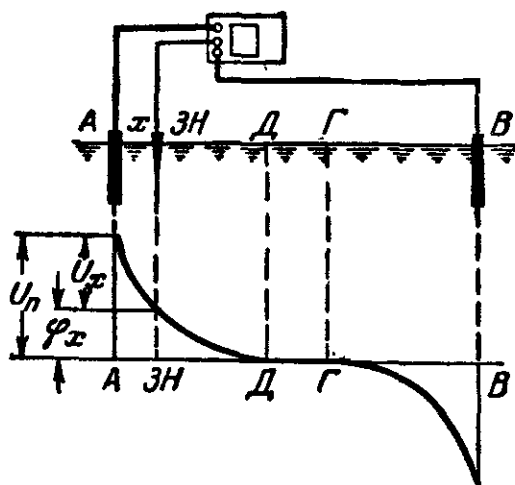


Рис. 9-52. Схема для измерения потенциалов при помощи прибора для измерения сопротивления заземлений и кривая падения напряжения.

и точкой нулевого потенциала, а также между тем же заземлителем и точкой x , потенциал которой нужно определить.

Обозначив U_n измеренное напряжение между испытуемым заземлителем и точкой нулевого потенциала, а U_x — измеренное напряжение между тем же заземлителем и точкой x , можно написать выражение потенциала этой точки

$$\varphi_x = U_n - U_x,$$

или этот потенциал можно выразить в процентах полного потенциала заземлителя

$$\varphi_{x\%} = \frac{U_n - U_x}{U_n} 100\% = \left(1 - \frac{U_x}{U_n}\right) 100\%.$$

Для определения потенциалов точек вокруг испытуемого заземлителя A при помощи прибора для измерения сопротивлений заземлений измеряют сопротивление заземления между заземлителем и точкой нулевого по-

тенциала r_A , а также между заземлителем и какой-либо точкой x , потенциал которой нужно определить (рис. 9-52). В этом случае

$$\varphi_n = U_n = I r_A \text{ и } U_x = I r_x,$$

откуда

$$\begin{aligned} \varphi_{x\%} &= \frac{U_n - U_x}{U_n} 100\% = \frac{I r_A - I r_x}{I r_A} 100\% = \\ &= \frac{r_A - r_x}{r_A} 100\% = \left(1 - \frac{r_x}{r_A}\right) 100\%. \end{aligned}$$

Глава десятая

ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ, ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ

А. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ПРИБОРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ

10-1. ЗАМЕЧАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ИЗМЕРЕНИЮ ИНДУКТИВНОСТИ, ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ И ЕМКОСТИ

При выборе метода измерения и производстве измерений индуктивности L , взаимной индуктивности M и емкости C , необходимо иметь в виду, что эти величины в большей или меньшей степени зависят от ряда факторов: при наличии в магнитном поле ферромагнитных материалов L и M зависят от величины тока, напряжения и от внешних магнитных полей; C — от частоты переменного тока, напряжения, присутствия в его электрическом поле изолирующих материалов, температуры и т. д.

Если тот или другой фактор влияет на измеряемую величину в такой мере, что им пренебречь нельзя, то при измерении необходимо в отношении этого фактора создать для измеряемого объекта те условия, в которых он будет находиться при его эксплуатации. Если же зависимость между влияющим фактором и измеряемой величиной известна, то измерение можно проводить в условиях, отличных от условий эксплуатации, но после измерения сделать соответствующий пересчет найденного

результата измерения. Наконец, если измеряемая величина не зависит от того или иного фактора или этой зависимостью можно пренебречь, то измерение можно проводить в отношении данного фактора в любых условиях.

Пример 10-1. Если в магнитном поле электрической цепи, индуктивность которой нужно измерить, отсутствуют ферромагнитные материалы, то индуктивность ее не зависит от величины тока цепи и, следовательно, измерение ее можно проводить при любом значении тока, не превышающем ее номинальный ток.

Пример 10-2. Если необходимо измерить емкость конденсатора с воздушной изоляцией, величина которой не зависит от напряжения, то, очевидно, ее измерение можно проводить при любом значении напряжения, не превышающем его номинальной величины.

Пример 10-3. При измерении емкости конденсатора с бумажной изоляцией, работающего нормально при частоте 50 гц, при требовании к точности измерения $\pm 1\%$ следует пользоваться той же частотой или близкой к ней и дополнительно измерять температуру окружающей среды, так как емкость таких конденсаторов при изменении частоты от 50 до 1000 гц может измениться на 1—2% и на такую же величину может измениться емкость при изменении температуры на $\pm 10^\circ \text{C}$.

10-2. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

а) Метод амперметра и вольтметра

Для определения индуктивности катушки пользуемся схемой, данной на рис. 10-1; при этом необходимо, чтобы форма кривой напряжения практически не отличалась от синусоиды.

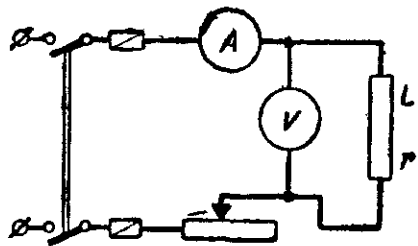


Рис 10-1. Схема для измерения индуктивности амперметром и вольтметром.

Если сопротивление катушки относительно велико, то верхний зажим вольтметра включают перед амперметром по тем же соображениям, что и при измерении сопротивления методом амперметра и вольтметра.

Измеряя напряжения U и ток I , можно определить полное сопротивление катушки $z = \frac{U}{I}$. С другой стороны, известно, что

$$z = \sqrt{r^2 + \omega^2 L^2},$$

откуда

$$L = \frac{\sqrt{z^2 - r^2}}{\omega}. \quad (10-1)$$

Определив сопротивление z , зная активное сопротивление катушки r и угловую частоту $\omega = 2\pi f$, можно определить индуктивность. Точность измерения этим методом низкая.

б) Метод ваттметра

Для определения индуктивности катушки соединяем приборы по схеме (рис. 10-2, а или б) в зависимости от величины сопротивления катушки.

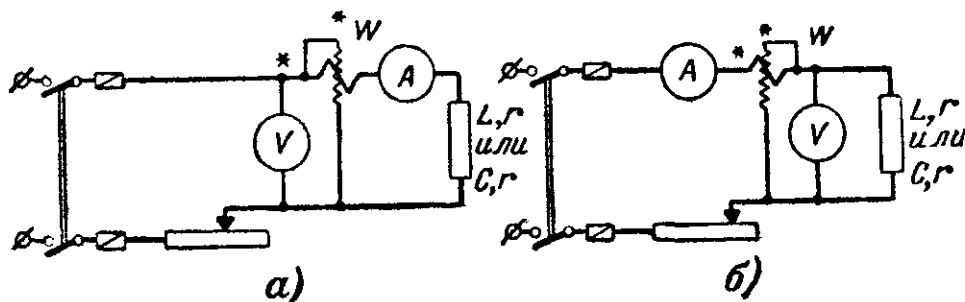


Рис. 10-2. Схема для измерения индуктивности или емкости амперметром, вольтметром и ваттметром.

Для данного случая

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Но так как мощность

$$P = I^2 r,$$

то

$$r = \frac{P}{I^2}.$$

Подставляя значение r в формулу для индуктивности, получаем:

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{\omega} \sqrt{z^2 - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2} = \frac{1}{\omega I^2} \sqrt{z^2 I^4 - P^2} = \\ &= \frac{1}{\omega I^2} \sqrt{U^2 I^2 - P^2}. \end{aligned} \quad (10-2)$$

Точность измерения также низкая.

10-3. ИЗМЕРЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

а) Метод амперметра и вольтметра

Для определения взаимной индуктивности пользуемся схемой рис. 10-3.

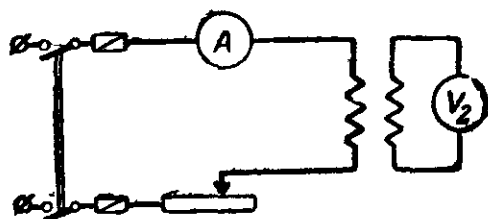
Если в первичной катушке проходит ток I_1 , то во вторичной катушке будет наводиться э. д. с.

$$E_2 = MI_1\omega,$$

откуда взаимная индуктивность

$$M = \frac{E_2}{I_1\omega}. \quad (10-3)$$

Зная угловую частоту $\omega = 2\pi f$ и измерив ток I_1 и э. д. с. E_2 , можно по приведенной формуле подсчитать взаимную индуктивность M .



По существу данный метод требует применения электростатического вольтметра, при пользовании которым можно получить наилучшие результаты.

Рис. 10-3. Схема для измерения взаимной индуктивности амперметром и вольтметром.

Если применяется вольтметр другой системы, то погрешность при определении $M(E_2)$ тем меньше, чем большим внутренним сопротивлением обладает вольтметр.

б) Метод последовательного соединения катушек

Соединив две катушки последовательно таким образом, чтобы намагничивающие силы их были направлены одинаково (рис. 10-4,а), можем написать выражение индуктированной в цепи этих катушек э. д. с.:

$$\begin{aligned} e &= -L_a \frac{di}{dt} = -\left(L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + 2M \frac{di}{dt}\right) = \\ &= -(L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt}, \end{aligned}$$

откуда

$$L_a = L_1 + L_2 + 2M, \quad (10-4)$$

где L_a — индуктивность двух последовательно соединенных катушек с одинаково направленными н. с. Индуктивность L_a можно определить одним из методов измерения индуктивности и, в частности, методом амперметра и вольтметра, пользуясь формулой

$$L_a = \frac{1}{\omega} \sqrt{z_a^2 - (r_1 + r_2)^2},$$

где z_a — полное сопротивление цепи двух катушек, соединенных по схеме рис. 10-4,а;
 r_1 и r_2 — активные сопротивления катушек.

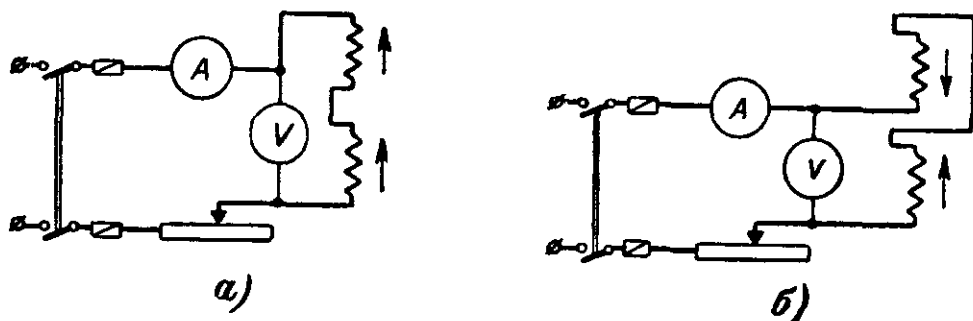


Рис. 10-4. Схема для измерения взаимной индуктивности методом последовательного соединения катушек.

а — намагничивающие силы одинаково направлены, б — намагничивающие силы направлены навстречу друг другу.

Теперь соединим катушки последовательно таким образом, чтобы их н. с. были направлены встречно (рис. 10-4,б). В этом случае наведенная в цепи двух катушек э. д. с.

$$\begin{aligned} e &= -L_6 \frac{di}{dt} = -\left(L_1 \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} - 2M \frac{di}{dt}\right) = \\ &= -(L_1 + L_2 - 2M) \frac{di}{dt}, \end{aligned}$$

откуда

$$L_6 = L_1 + L_2 - 2M, \quad (10-5)$$

где L_6 — индуктивность последовательно соединенных катушек, н. с. которых направлены навстречу друг другу; индуктивность L_6 можно определить одним из методов измерения индуктивности и, в частности, методом амперметра и вольтметра, пользуясь формулой

$$L_6 = \frac{1}{\omega} \sqrt{z_6^2 - (r_1 + r_2)^2},$$

где z_{σ} — полное сопротивление цепи двух катушек, соединенных последовательно так, что н. с. их направлены встречно.

Вычитая почленно из уравнения (10-4) уравнение (10-5), получаем:

$$L_a - L_{\sigma} = 4M,$$

откуда

$$M = \frac{L_a - L_{\sigma}}{4}. \quad (10-6)$$

10-4. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ ПЕРЕМЕННЫМ ТОКОМ

а) Метод амперметра и вольтметра

Если пренебречь потерями в диэлектрике конденсатора, то емкость его можно определить методом амперметра и вольтметра (схема на рис. 10-5).

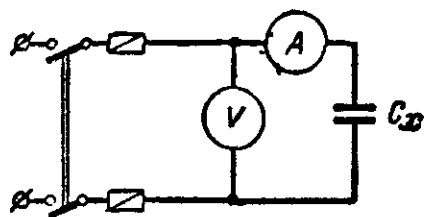


Рис. 10-5. Измерение емкости амперметром и вольтметром.

Разделив показание вольтметра на показание амперметра, получим сопротивление емкости:

$$\frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C_x} = \frac{1}{2\pi f C_x},$$

откуда при известной частоте тока легко определить емкость

$$C_x = \frac{I}{U \cdot 2\pi f}. \quad (10-7)$$

При измерении емкости методом амперметра и вольтметра особенно важна синусоидальность напряжения источника питания. Несинусоидальность кривой выражает наличие в цепи гармонических составляющих повышенной частоты, а проводимость емкости увеличивается пропорционально частоте. Незначительным искажениям кривой напряжения соответствует значительное искажение кривой тока, что может привести к большим погрешностям (порядка 25%) в результатах измерения емкости.

б) Метод ваттметра

Если потерями в диэлектрике конденсатора пренебречь нельзя, то емкость его можно определить методом ваттметра. Схема соединения аналогична соответствующей схеме для измерения индуктивности (рис. 10-2, а и б).

Точность результатов измерения, получаемых этим методом, несколько выше по сравнению с предыдущим методом.

Измерив ток, напряжение и мощность, можно определить полное сопротивление конденсатора с потерями (последовательной эквивалентной схемы) $z = U/I$. С другой стороны, известно, что $z = \sqrt{r^2 + x_c^2}$; следовательно, реактивное сопротивление емкости

$$x_c = \frac{1}{\omega C_x} = \sqrt{z^2 - r^2}.$$

Исходя из последнего выражения и зная частоту переменного тока, можно определить величину емкости

$$\begin{aligned} C_x &= \frac{1}{\omega \sqrt{z^2 - r^2}} = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{U^2}{I^2} - \left(\frac{P}{I^2}\right)^2}} = \\ &= \frac{I^2}{\omega \sqrt{\frac{U^2 I^4}{I^2} - \frac{P^2 I^4}{I^4}}} = \frac{I^2}{2\pi f \sqrt{U^2 I^2 - P^2}}. \end{aligned} \quad (10-8)$$

Приняв во внимание, что мощность потерь в конденсаторе

$$P = UI \cos \varphi = I^2 \frac{1}{\omega C} \operatorname{tg} \delta,$$

можно определить тангенс угла потерь

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{I^2 \frac{1}{\omega C_x}} = \frac{P \omega C_x}{I^2}.$$

Заменяя в последней формуле емкость C_x ее выражением из (10-8), получаем:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P \omega \frac{I^2}{\omega \sqrt{U^2 I^2 - P^2}}}{I^2} = \frac{P}{\sqrt{U^2 I^2 - P^2}}. \quad (10-9)$$

Определение мощности потерь в конденсаторах при помощи ваттметра не всегда возможно, так как эта мощность обычно весьма мала. Поэтому чаще пользуются мостовыми методами, дающими возможность определения как емкости, так и тангенса угла потерь (см. § 10-10).

10-5. ПРИБОРЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЕМКОСТИ (ФАРАДОМЕТРЫ)

Приборы для непосредственного измерения емкости называются фарадометрами или микрофарадометрами.

На рис. 10-6 дана схема одного из таких приборов — микрофарадометра электромагнитной системы типа ЭФ, изготовляемого Киевским заводом.

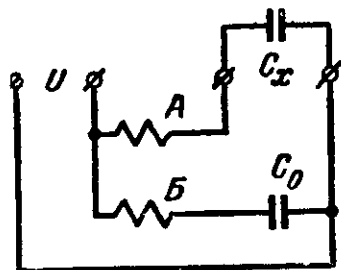


Рис. 10-6. Схема микрофарадометра.

Микрофарадометр представляет собой электромагнитный логометр (см. § 4-2). Последовательно с одной из его катушек включен образцовый конденсатор C_0 , последовательно с другой — измеряемый конденсатор C_x (рис. 10-6). Катушки логометра с последовательно соединенными конденсаторами образуют

две параллельные ветви, включаемые в сеть переменного тока.

Токи в ветвях прибора

$$I_A = U\omega C_x \text{ и } I_B = U\omega C_0.$$

Угол поворота подвижной части [см. уравнение (4-10)]:

$$\alpha = F \left(\frac{I_A^2}{I_B^2} \right) = F \left(\frac{C_x^2}{C_0^2} \right) = F_1(C_x). \quad (10-10)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части логометра зависит только от величины емкости испытуемого конденсатора. Прибор имеет два предела измерения: 1—2 или 5—10 мкф. Получение двух пределов измерения достигается делением обмотки катушки А прибора на две части, которые включаются последовательно или параллельно.

Микрофарадометр типа ЭФ имеет класс точности 1.

10-6. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ БАЛЛИСТИЧЕСКИМ ГАЛЬВАНОМЕТРОМ

Схема для измерения емкости дана на рис. 10-7. Если при положении движка реостата у зажима *A* замкнуть рубильник и поставить переключатели Π_1 и Π_2 в поло-

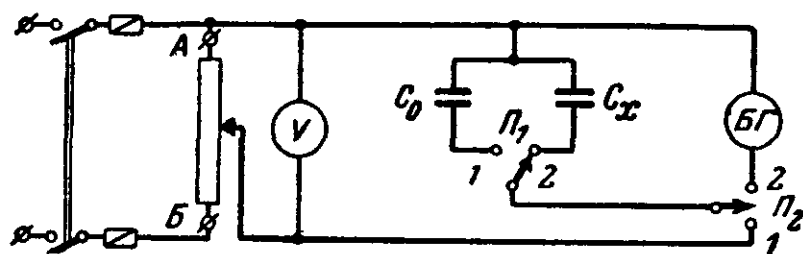


Рис. 10-7. Схема измерения емкости баллистическим гальванометром.

жение 1, 1, а затем перемещением движка реостата увеличить напряжение до значения U_1 , то образцовый конденсатор получит заряд

$$Q_0 = U_1 C_0.$$

Если теперь переключатель Π_2 перевести из положения 1 в положение 2, то конденсатор разрядится через баллистический гальванометр и подвижная часть последнего переместится на угол α_1 .

Для этого случая можно написать:

$$\alpha_1 C_q = U_1 C_0,$$

откуда определяется баллистическая постоянная гальванометра

$$C_q = \frac{U_1 C_0}{\alpha_1}. \quad (10-11)$$

Если теперь при положении движка реостата у зажима *A* переключатель Π_1 поставить в положение 2, а переключатель Π_2 — в положение 1 и увеличить напряжение до значения U_2 , то испытуемый конденсатор получит заряд

$$Q_x = U_2 C_x.$$

При переводе переключателя Π_2 из положения 1 в положение 2 конденсатор разрядится через гальванометр, вследствие чего подвижная часть гальванометра повернется на угол α_2 .

Для этого случая можно написать:

$$\alpha_2 C_q = U_2 C_x,$$

откуда измеряемая емкость

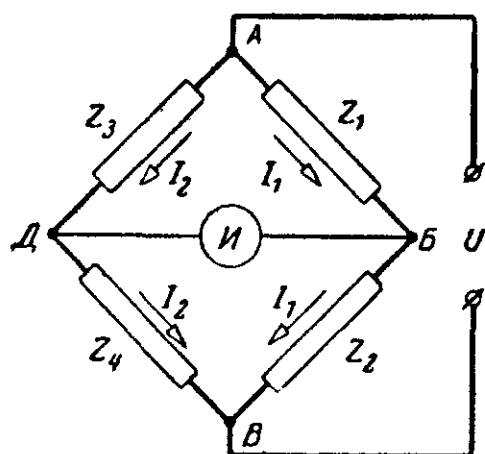
$$C_x = \frac{C_q}{U_2} \alpha_2. \quad (10-12)$$

При этом методе измерения возможны большие погрешности из-за явления остаточного заряда (неполный разряд конденсатора).

Б. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ СРАВНЕНИЯ

10-7. УСЛОВИЯ РАВНОВЕСИЯ МОСТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Общая схема моста переменного тока дана на рис. 10-8. Четыре плеча моста образуются четырьмя сопротивлениями: z_1 , z_2 , z_3 и z_4 . В диагонали AB имеется источник питания переменного тока, в диагонали BD — гальванометр переменного тока.



Если мост уравновешен, о чем можно судить по показанию гальванометра, то падения напряжений на плечах AB и AD равны; также будут равны и падения напряжений на плечах моста BB и DB . Применяя символический метод, можно написать:

$$\dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_2 Z_3$$

и

$$\dot{I}_1 Z_2 = \dot{I}_2 Z_4.$$

Поделив почленно одно уравнение на другое, получим условия равновесия моста на переменном токе:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (10-13)$$

или

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3. \quad (10-14)$$

Так как

$$Z_1 = z_1 e^{j\varphi_1}; \quad Z_2 = z_2 e^{j\varphi_2}; \\ Z_3 = z_3 e^{j\varphi_3} \text{ и } Z_4 = z_4 e^{j\varphi_4},$$

то уравнение (10-14) может быть написано следующим образом:

$$z_1 z_4 e^{j(\varphi_1 + \varphi_4)} = z_2 z_3 e^{j(\varphi_2 + \varphi_3)}. \quad (10-15)$$

Уравнение (10-15) может быть заменено двумя уравнениями:

$$z_1 z_4 = z_2 z_3; \quad (10-16)$$

$$\varphi_1 + \varphi_4 = \varphi_2 + \varphi_3. \quad (10-17)$$

Из написанного следует, что для равновесия моста переменного тока необходимо выполнить два условия:

1) произведение модулей сопротивлений одной пары противолежащих плеч должно быть равно произведению модулей сопротивлений другой пары противолежащих плеч (10-16);

2) сумма фазных углов одной пары противолежащих плеч должна быть равна сумме фазных углов другой пары противолежащих плеч (10-17).

Значительное распространение получили мосты переменного тока, у которых два плеча выполнены из активных (безреактивных) сопротивлений, а два других содержат реактивные сопротивления. Для таких мостов уравнение (10-17) дает возможность сделать следующие выводы:

1) если два смежных плеча моста обладают только активными сопротивлениями, например $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$, то два других плеча должны обладать или индуктивностями, или емкостями (рис. 10-9), так как должно быть выполнено условие $\varphi_1 = \varphi_2$;

2) если два противолежащих плеча моста обладают только активными сопротивлениями, например $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$, то одно из двух других противолежащих плеч должно обладать индуктивностью, а другое — емкостью (рис. 10-10), так как должно быть выполнено условие $\varphi_1 + \varphi_4 = 0$, что возможно при $\varphi_1 = -\varphi_4$ или $\varphi_4 = -\varphi_1$.

Таким образом, мост переменного тока дает возможность сравнивать между собой индуктивности или емкости и сравнивать индуктивность с емкостью.

Если в уравнение равновесия моста входят: активное сопротивление, индуктивность и емкость, а частота источника питания отсутствует, то мост называется частотонезависимым, в противном случае, т. е. при наличии частоты, мост называется частотозависимым.

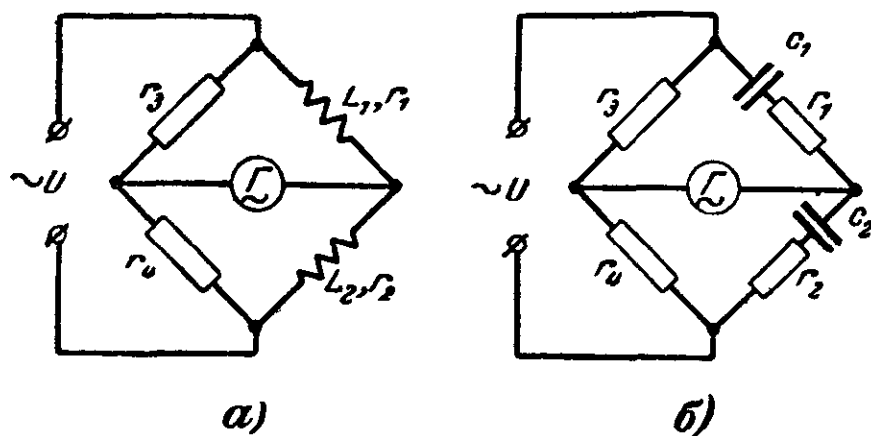


Рис. 10-9. Схема мостов с реактивными сопротивлениями в смежных плечах.

Частотонезависимые мосты, уравновешенные при какой-либо определенной частоте, сохраняют равновесие и при других частотах и, следовательно, могут работать и при несинусоидальной форме кривой напряжения источника питания. Частотозависимые мосты, наоборот, могут быть уравновешены только при синусоидальной форме кривой напряжения источника питания.

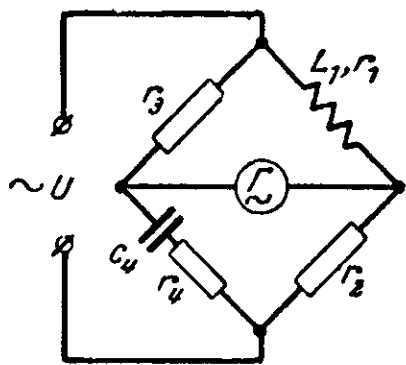


Рис. 10-10. Схема моста с реактивными сопротивлениями в противоположащих плечах.

Так как равновесие моста переменного тока определяется двумя уравнениями, то для получения этого равновесия необходима регулировка не менее двух параметров схемы моста. Уравновешивание моста обычно заключается в по-

переменной регулировке двух его параметров — элементов моста. Свойство моста, обуславливающее число необходимых для уравновешивания попеременных регулировочных операций, называется сходимостью моста. Плохая сходимость обозначает большое число операций

и, следовательно, вызывает удлинение процесса измерения.

Сходимость зависит от типа моста и выбора регулируемых элементов.

10-8. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ МОСТОМ

а) Мост для измерения индуктивности путем сравнения ее с образцовой индуктивностью

Схема моста дана на рис. 10-11а. Первое плечо состоит из испытуемой катушки индуктивности L_x с сопротивлением r_x и последовательно соединенного с ней магазина сопротивлений r_1 . Второе плечо состоит из образцовой катушки индуктивности L_0 с сопротивлением r_0 и последовательно соединенного с ней магазина сопротивлений r_2 . Плечи моста r_3 и r_4 созданы магазинами сопротивлений. Иногда вместо двух магазинов сопротивлений r_1 и r_2 берут только один, который при помощи переключателя может включаться в то или другое плечо моста. В одну из диагоналей можно включать источник питания постоянного или переменного тока. Во вторую диагональ моста можно включать гальванометр постоянного тока или гальванометр переменного тока (последний иногда заменяют телефоном).

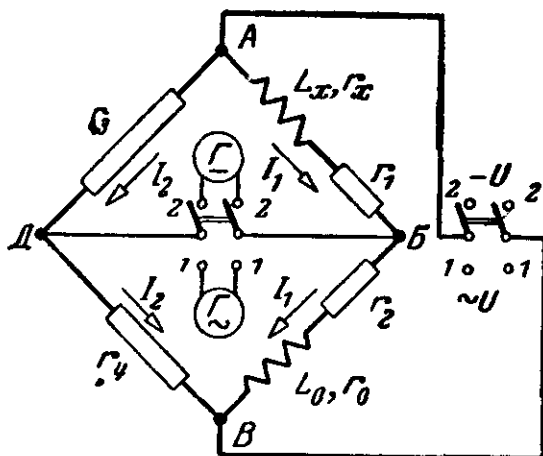


Рис. 10-11а. Схема моста для измерения индуктивности.

Изменяя сопротивления r_1 , r_2 , r_3 и r_4 , можно достичь равновесия моста, при котором стрелка гальванометра переменного тока устанавливается на нуле шкалы. Для этого случая уравновешенного моста согласно (10-14), можем написать:

$$[(r_1 + r_x) + j\omega L_x] r_4 = [(r_2 + r_0) + j\omega L_0] r_3,$$

откуда следуют два условия равновесия моста:

$$(r_1 + r_x) r_4 = (r_2 + r_0) r_3$$

и

$$r_4 j\omega L_x = r_3 j\omega L_0$$

или

$$\frac{r_1 + r_x}{r_2 + r_0} = \frac{r_3}{r_4} \quad (10-18)$$

и

$$\frac{L_x}{L_0} = \frac{r_3}{r_4} \quad (10-19)$$

Таким образом, для равновесия моста необходимо отрегулировать сопротивления r_3 и r_4 так, чтобы их отношение было равно отношению индуктивности L_x и L_0 , а сопротивления $r_1 + r_x$ и $r_2 + r_0$ так, чтобы их отношения были равны отношению сопротивлений r_3 и r_4 .

Первая из этих регулировок производится на переменном токе, а вторая — на постоянном.

Уравновесив мост, искомую индуктивность определяют по формуле

$$L_x = L_0 \frac{r_3}{r_4}. \quad (10-20)$$

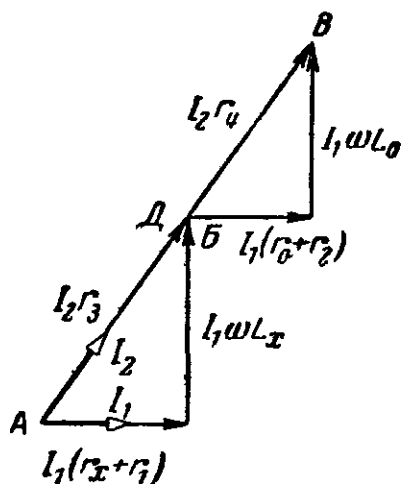


Рис. 10-116. Векторная диаграмма уравновешенного моста.

Регулировка моста производится следующим образом.

Ставят переключатели в положение 1—1 и регулируют сопротивления r_3 и r_4 до получения наименьшего значения тока в гальванометре. После этого ставят переключатели в положение 2—2 и регулируют сопротивления r_1 и r_2 до получения наименьшего показания гальванометра. Затем снова ставят переключатели в положение 1—1 и изменением сопротивлений r_3 и r_4 получают наименьшее отклонение гальванометра и т. д.

После нескольких таких регулировок можно подобрать сопротивления r_1 , r_2 , r_3 и r_4 так, что мост будет уравновешен как на постоянном, так и на переменном токе.

Такие попеременные регулировки на переменном и постоянном токе возможны только в том случае, если индуктивность L_x не зависит от тока. Векторная диаграмма уравновешенного моста приведена на рис. 10-116.

При низкой частоте, когда добротности плеч $\left(\frac{\omega L_x}{r_x + r_1} \right)$ и $\frac{\omega L_o}{r_o + r_2}$ малы, схема обладает плохой сходимостью.

б) Мост для измерения индуктивности путем сравнения ее с емкостью

Схема моста дана на рис. 10-12а.

Первое плечо состоит из испытуемой катушки индуктивности L_x с сопротивлением r_x . Второе и третье плечи состоят из безреактивных магазинов сопротивлений. Четвертое плечо выполнено из образцового конденсатора емкостью C_o и магазина сопротивлений r_o , соединенных параллельно.

Для схемы, данной на рис. 10-12а, можно написать:

$$Z_1 = r_x + j\omega L_x; Z_2 = r_2;$$

$$Z_3 = r_3; Z_4 = \frac{r_o \frac{1}{j\omega C_o}}{r_o + \frac{1}{j\omega C_o}}.$$

После преобразования получим:

$$Z_4 = \frac{r_o}{1 + j\omega C_o r_o}.$$

Подставив написанные выражения плеч в уравнение (10-14), для уравновешенного моста получим:

$$\frac{r_x + j\omega L_x}{r_2} = \frac{r_3(1 + j\omega C_o r_o)}{r_o},$$

откуда можно вывести два условия равновесия моста:

$$\frac{r_x}{r_2} = \frac{r_3}{r_o} \quad (10-21)$$

и

$$\frac{\omega L_x}{r_2} = \omega C_o r_3, \quad (10-22)$$

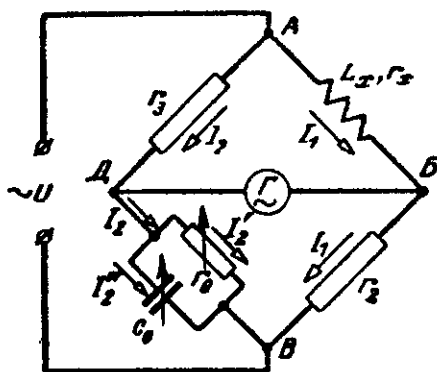


Рис. 10-12а. Схема моста для измерения индуктивности путем сравнения ее с емкостью.

из которых получаем выражения для определения измеряемых величин

$$r_x = r_2 \frac{r_3}{r_0} \quad (10-23)$$

и

$$L_x = C_0 r_2 r_3. \quad (10-24)$$

Добротность катушки можно определить, пользуясь формулой

$$Q = \frac{\omega L_x}{r_x} = \omega C_0 r_0. \quad (10-25)$$

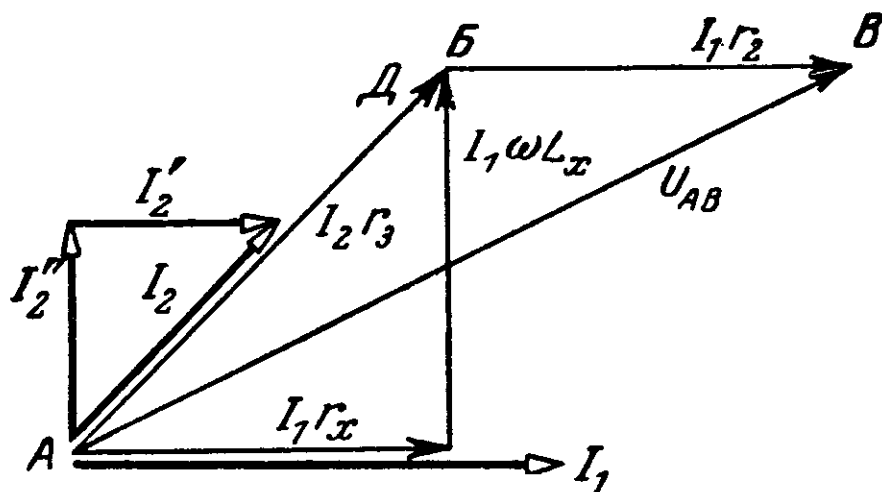


Рис 10-126 Векторная диаграмма уравновешенного моста.

Векторная диаграмма уравновешенного моста дана на рис. 10-126.

Уравновешивание моста можно производить, регулируя, например, C_0 и r_0 или r_3 и r_0 .

Недостаток моста — плохая сходимость при низких добротностях испытуемых катушек.

Наряду с четырехплечими мостами применяются шестиплечие мосты. Например, на рис. 10-13,а дана одна из таких схем для измерения индуктивности, применяемая в мосте типа Р50-1 отечественного производства.

Заменив треугольник ВГД, образованный сопротивлениями r_4 , r_5 и емкостью C , эквивалентной звездой, получим схему четырехплечего моста (рис. 10-13,б). Для этой схемы аналогично рассмотренному выше нетрудно найти условия равновесия и формулы для определения

$$r_x = \frac{r_2 r_3}{r_4} \quad (10-26)$$

и

$$L_x = C [r_2 r_3 + r_5 (r_x + r_2)]. \quad (10-27)$$

Уравновешивание моста можно производить сопротивлениями r_4 и r_5 . Выполнив первое условие равновесия $r_x r_4 = r_2 r_3$ регулировкой сопротивления r_4 , для выпол-

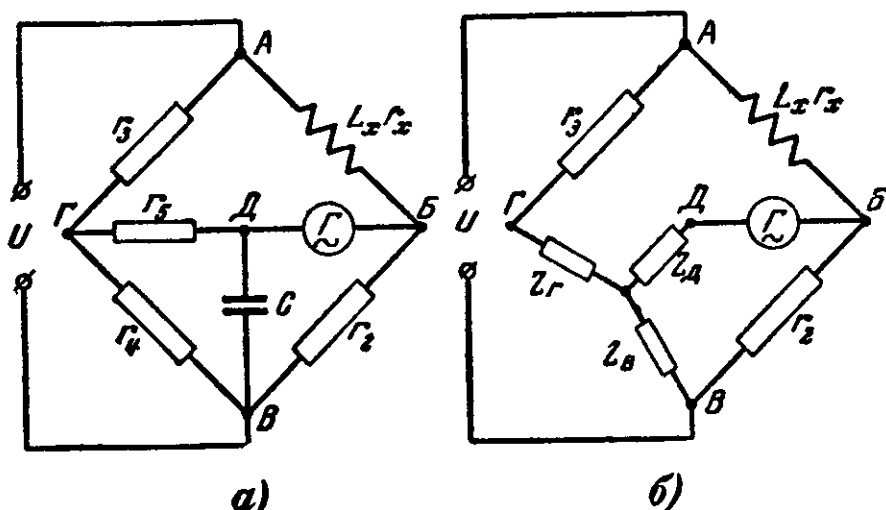


Рис. 10-13. Шестиплечий мост для измерения индуктивности.
а — схема, б — преобразованная схема

нения второго условия регулируют сопротивление r_5 , при этом не нарушается первое условие равновесия, так как r_5 не входит в это условие.

При указанных регулируемых сопротивлениях мост имеет хорошую сходимость, что является большим достоинством схемы.

10-9. ИЗМЕРЕНИЕ ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТИ МОСТОМ

На рис. 10-14 дана одна из возможных схем моста для измерения взаимной индуктивности.

В неразветвленной части цепи и в первом плече моста включены катушки, взаимная индуктивность которых измеряется. Три остальных плеча выполнены из активных сопротивлений.

Для уравновешенного моста можно написать:

$$I_1 r_2 = I_2 r_4$$

и

$$I_2 r_3 = I_1 (r_1 + j\omega L_1) + j\omega I M_x.$$

Приравняв действительные и мнимые члены правой и левой частей последнего уравнения, получим:

$$I_2 r_3 = I_1 r_1$$

и

$$0 = jI_1 \omega L_1 + j\omega I M_x \text{ или } I_1 L_1 = -I M_x.$$

Последнее уравнение показывает, что равновесие моста наступает при равенстве э. д. с. самоиндукции и э. д. с. взаимной индукции, когда они компенсируют

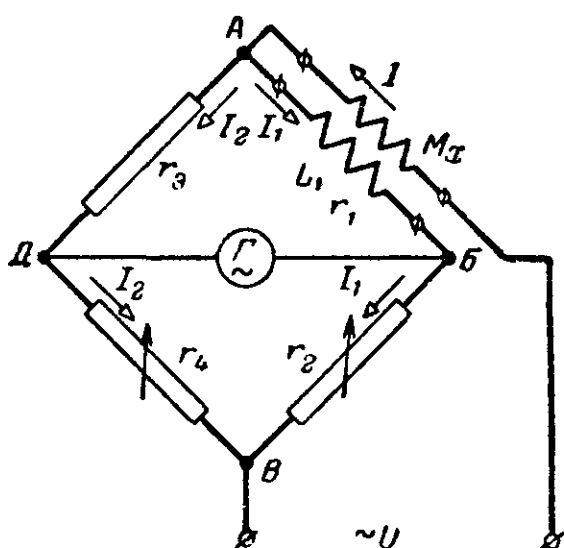


Рис. 10-14 Схема моста для измерения взаимной индуктивности.

друг друга, вследствие чего угол сдвига между током и напряжением в первом плече моста равен нулю ($\varphi_1 = 0$). Этого и следовало ожидать, так как при $\varphi_2 = \varphi_3 = \varphi_4 = 0$ уравнение (10-17) удовлетворяется только при $\varphi_1 = 0$. Таким образом, катушки, взаимная индуктивность которых измеряется, должны быть соединены встречно.

Из последнего уравнения следует:

$$M_x = -L_1 \frac{I_1}{I}.$$

Так как

$$I = I_1 + I_2; \frac{I_2}{I_1} = \frac{r_2}{r_4},$$

то величина взаимной индуктивности

$$M_x = L_1 \frac{I_1}{I_1 + I_2} = L_1 \frac{1}{1 + \frac{I_2}{I_1}} = L_1 \frac{1}{1 + \frac{r_2}{r_4}}. \quad (10-28)$$

Измерение взаимной индуктивности можно также производить мостом переменного тока для измерения индуктивности, применяя метод последовательного соединения катушек (см. § 10-3).

10-10. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ МОСТОМ

На рис. 10-15,а дана одна из возможных схем для измерения емкости мостом переменного тока.

Плечо моста AB (Z_1) образуется испытуемым конденсатором, который может быть замещен эквивалентной последовательной схемой. Плечо AD (Z_3) состоит из образцового конденсатора без потерь, последовательно

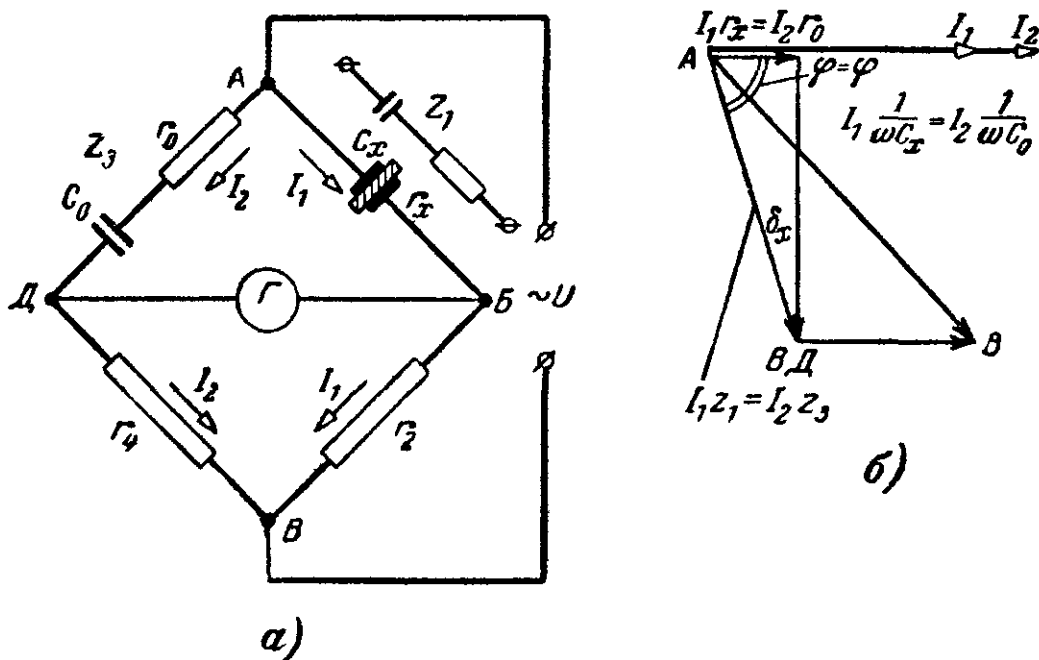


Рис. 10-15. Мост для измерения емкости.

а — схема; б — векторная диаграмма уравновешенного моста.

с которым включено образцовое сопротивление r_0 (магазин сопротивлений). Плечи моста BB (Z_2) и $ДВ$ (Z_4) образуются двумя магазинами сопротивлений или участками калиброванной манганиновой проволоки. В диагонали $БД$ включен вибрационный гальванометр, а в диагонали AB — источник питания переменного тока.

Для уравновешенного моста согласно формуле (10-14)

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3,$$

или для нашего случая

$$\left(r_x + \frac{1}{j\omega C_x}\right)r_4 = \left(r_0 + \frac{1}{j\omega C_0}\right)r_2;$$

отсюда следует, что

$$r_x r_4 = r_0 r_2 \quad (10-29)$$

$$\frac{r_4}{j\omega C_x} = \frac{r_2}{j\omega C_0}.$$

После преобразования уравнение примет вид:

$$\frac{r_4}{C_x} = \frac{r_2}{C_0}, \quad (10-30)$$

откуда искомая емкость

$$C_x = C_0 \frac{r_4}{r_2}. \quad (10-31)$$

Из векторной диаграммы уравновешенного моста (рис. 10-15, б) можно определить тангенс угла потерь:

$$\operatorname{tg} \delta_0 = \operatorname{tg} \delta_x = \frac{I_2 r_0}{I_2 \frac{1}{\omega C_0}} = r_0 \omega C_0. \quad (10-32)$$

Из уравнений (10-29) и (10-30) следует, что для получения равновесия моста нужно подобрать не только отношение $\frac{r_4}{r_2} = \frac{C_x}{C_0}$, но и отношение $\frac{r_4}{r_2} = \frac{r_0}{r_x}$.

Регулировка моста ведется следующим образом. Установив $r_0 = 0$, изменяют сопротивления r_4 и r_2 до получения наименьшего значения тока в диагонали вибрационного гальванометра. После этого, не изменяя сопротивлений r_4 и r_2 , регулируют сопротивления r_0 , уменьшая ток в диагонали гальванометра. Далее, не изменяя сопротивления r_0 , снова регулируют сопротивления r_4 и r_2 и т. д., до тех пор, пока ток в гальванометре не станет равен нулю. Уравновесив мост, определяют искомые величины C_x и $\operatorname{tg} \delta_x$ по формулам (10-31) и (10-32).

В том случае, когда потерями в испытуемом конденсаторе можно пренебречь ($r_x = 0$), нет необходимости в сопротивлении r_0 ($r_0 = 0$) и, следовательно, на основании уравнения (10-14) для уравновешенного моста будем иметь:

$$\frac{1}{\omega C_x} r_4 = \frac{1}{\omega C_0} r_2; \quad \frac{r_4}{C_x} = \frac{r_2}{C_0},$$

откуда $C_x = C_0 \frac{r_4}{r_2}$, т. е. получили уравнение (10-31).

На практике для испытаний кабелей и других элементов высоковольтных установок часто пользуются высоким напряжением для питания моста; в таких случаях применяют схему моста, данную на рис. 10-16. В этой схеме регулируемые плечи моста находятся под низкими напряжениями относительно земли, и, следовательно,

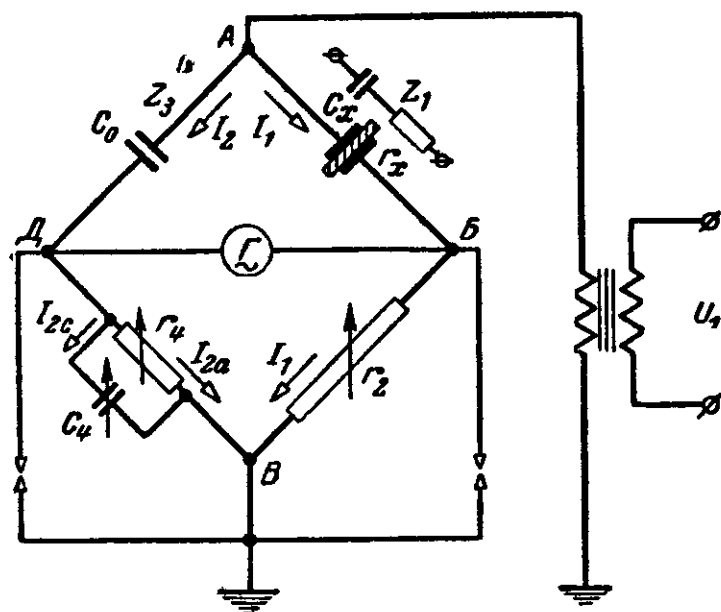


Рис. 10-16 Схема высоковольтного моста для измерения емкости и угла потерь.

работа с мостом является безопасной. Для устранения опасности появления высоких напряжений на этих плечах в случае пробоя изоляции конденсаторов к точкам моста *БД* присоединяются искровые разрядники, которые при повышении напряжения пробиваются и заземляют регулируемые плечи моста.

В этой схеме (рис. 10-16) плечо моста *АБ* (Z_1) образуется испытуемым кабелем, который может быть замещен последовательной эквивалентной схемой. Плечо моста *АД* (Z_3) образуется конденсатором без потерь (воздушный конденсатор). Плечо моста *БВ* (Z_2) состоит из магазина сопротивлений, а плечо *ДВ* (Z_4) — из параллельно соединенных магазина сопротивлений и магазина емкостей. В одну диагональ включается вибрационный гальванометр, в другую — вторичная обмотка высоковольтного трансформатора.

Для уравновешенного моста согласно (10-14) можно написать $Z_2 Z_3 = Z_1 Z_4 = Z_1 / Y_4$ или для нашего случая

$$Z_1 = r_x - j \frac{1}{\omega C_x} = r_2 \left(-j \frac{1}{\omega C_0} \right) \left(\frac{1}{r_4} + j \omega C_4 \right).$$

Открывая скобки и сокращая на $j\omega$, получаем:

$$r_x - j \frac{1}{\omega C_x} = -\frac{r_2}{r_4} j \frac{1}{\omega C_0} + r_2 \frac{C_4}{C_0},$$

откуда непосредственно следуют два соотношения:

$$r_x = r_2 \frac{C_4}{C_0}$$

и

$$-j \frac{1}{\omega C_x} = -j \frac{r_2}{r_4} \frac{1}{\omega C_0}.$$

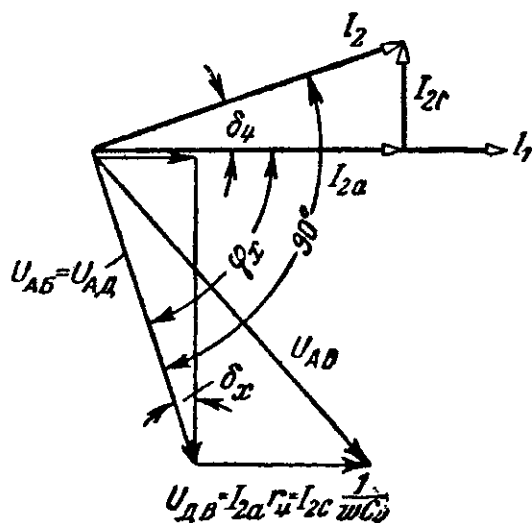


Рис. 10-17. Векторная диаграмма уравновешенного моста.

Последнему уравнению после сокращения общих множителей можно придать вид:

$$C_x = \frac{r_4}{r_2} C_0,$$

т. е. мы опять получили уравнение (10-31). Из векторной диаграммы (рис. 10-17) уравновешенного моста можно написать:

$$\operatorname{tg} \delta_x = \operatorname{tg} \delta_4 = \frac{I_1 r_x}{I_1 \frac{1}{\omega C_x}} = \frac{U_{DB} \omega C_4}{U_{DB} \frac{1}{r_4}} = r_x \omega C_x = r_4 \omega C_4.$$

(10-32a)

Уравнения (10-31) и (10-32) дают возможность определить искомые величины C_x и $\operatorname{tg} \delta_x$.

Регулировка моста ведется подбором величин отношения $\frac{r_4}{r_2}$ и величины C_4 .

Глава одиннадцатая

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

11-1. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА АМПЕРМЕТРОМ И ВОЛЬТМЕТРОМ

Мощность цепи постоянного тока можно определить косвенным методом, измерив ток и напряжение (рис. 11-1) и найдя их произведение

$$P = UI, \quad (11-1)$$

Этот способ обладает рядом недостатков, заключающихся:

1) в необходимости при каждом измерении производить вычисление, требующее затраты времени;

2) в значительной относительной погрешности при измерении мощности, равной сумме относительных погрешностей измерения напряжения и измерения тока;

3) в невозможности производить измерение при изменяющихся значениях тока и напряжения вследствие невозможности произвести одновременный отсчет по двум приборам и др.

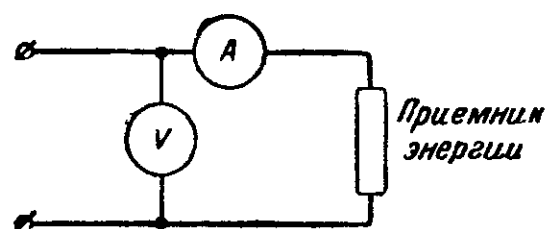


Рис 11-1 Схема для измерения мощности амперметром и вольтметром

11-2. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВАТТМЕТР В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Для непосредственного измерения мощности цепи постоянного тока применяется электродинамический ваттметр.

Электродинамический ваттметр (рис. 11-2) представляет собой измерительный механизм той же системы (см. § 4-3). Неподвижная последовательная катушка или катушка тока ваттметра соединяется последовательно с приемниками энергии. Подвижная параллельная катушка или катушка напряжения, соединенная последовательно с добавочным сопротивлением, образует параллельную цепь ваттметра, которая присоединяется параллельно приемникам энергии.

Угол поворота подвижной части ваттметра (4-13)

$$\alpha = k_2 I I_U = k_2 I \frac{U}{r_U},$$

где I — ток последовательной катушки;

I_U — ток параллельной катушки ваттметра.

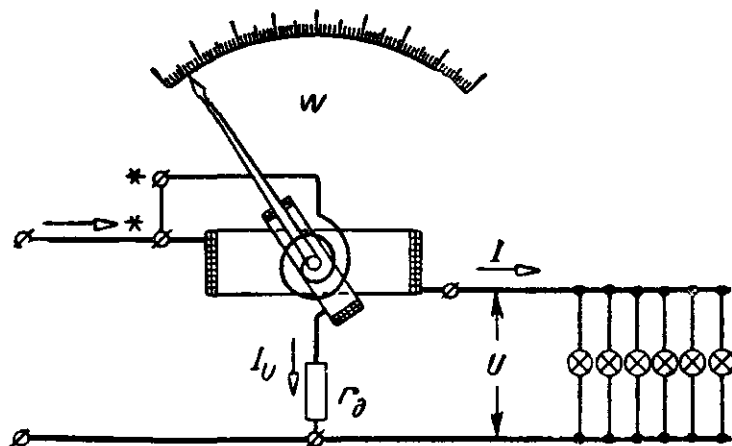


Рис. 11-2. Схема устройства и соединений электродинамического ваттметра.

Так как вследствие применения добавочного сопротивления параллельная цепь ваттметра имеет практически постоянное сопротивление r_U , то

$$\alpha = \frac{k_2}{r_U} I U = k_3 I U = k_3 P. \quad (11-2)$$

Таким образом, по углу поворота подвижной части ваттметра можно судить о мощности цепи.

Шкала ваттметра, как следует из уравнения (11-2), равномерна.

При работе с ваттметром необходимо иметь в виду, что изменение направления тока в одной из катушек вызывает изменение направления вращающего момента и направления поворота подвижной катушки, а так как обычно шкала ваттметра делается односторонней, т. е. деления шкалы расположены от нуля вправо, то при неправильном направлении тока в одной из катушек определение измеряемой величины по ваттметру будет невозможно.

По указанным причинам следует всегда различать зажимы ваттметра. Зажим последовательной обмотки, соединяемый с источником питания, называется генера-

торным и отмечается на приборах и схемах звездочкой. Зажим параллельной цепи, присоединяемый к проводу, соединенному с последовательной катушкой, также называется генераторным и отмечается звездочкой. Таким

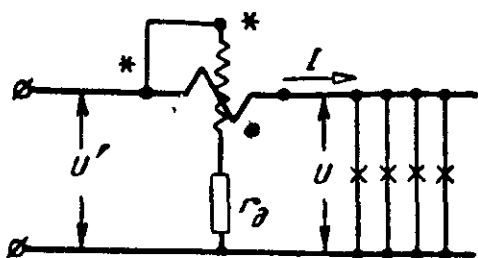


Рис. 11-3. Правильная схема включения ваттметра.

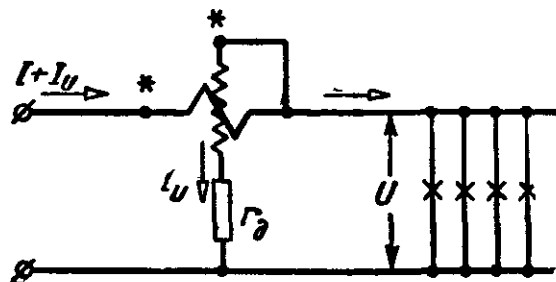


Рис. 11-4. Правильная схема включения ваттметра.

образом, при правильной схеме включения ваттметра токи в катушках ваттметра направлены от генераторных зажимов к негенераторным.

Могут иметь место две схемы включения ваттметра (рис. 11-3) и 11-4).

В схеме, данной на рис. 11-3, ток последовательной обмотки ваттметра равен току приемников энергии, мощность которых измеряется, а параллельная цепь ваттметра находится под напряжением U' , большим, чем напряжение приемников, на величину падения напряжения в последовательной катушке.

Следовательно,

$$P_{\text{в}} = IU' = I(U + U_I) = IU + IU_I, \quad (11-3)$$

т. е. мощность, измеряемая ваттметром, равна мощности приемников энергии, подлежащей измерению, и мощности последовательной обмотки ваттметра.

В схеме, данной на рис. 11-4, напряжение на параллельной цепи ваттметра равно напряжению на приемниках, а ток в последовательной обмотке больше тока, потребляемого приемником, на величину тока параллельной цепи ваттметра.

Следовательно,

$$P_{\text{в}} = U(I + I_U) = UI + UI_U, \quad (11-4)$$

т. е. мощность, измеряемая ваттметром, равна мощности приемников энергии, подлежащей измерению, и мощности параллельной цепи ваттметра.

При измерениях, в которых мощностью обмоток ваттметра можно пренебречь, предпочтительнее пользоваться схемой, показанной на рис. 11-3, так как обычно мощность последовательной обмотки меньше, чем параллельной, а следовательно, показания ваттметра будут более точными. При точных измерениях необходимо вводить поправки в показания ваттметра, обусловленные мощностью его обмотки, и в таких случаях можно рекомендо-

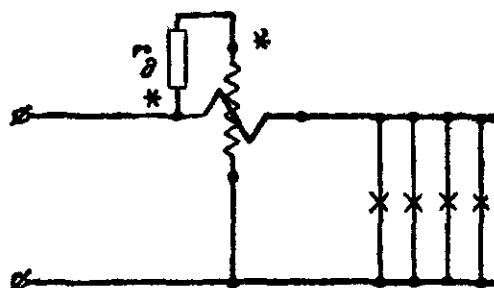


Рис. 11-5. Неправильная схема включения ваттметра.

довать схему на рис. 11-4, так как поправка легко вычисляется по формуле U^2/r_U , где r_U обычно известно, а поправка остается неизменной при различных значениях тока, если U постоянно.

При включении ваттметра по схеме на рис. 11-3 потенциалы концов катушек разнятся только на величину

падения напряжения в подвижной катушке, так как генераторные зажимы катушек соединены вместе.

Падение напряжения в подвижной катушке незначительно по сравнению с напряжением на параллельной цепи, так как сопротивление этой катушки незначительно по сравнению с сопротивлением параллельной цепи.

На рис. 11-5 дана неправильная схема включения параллельной цепи ваттметра. Здесь генераторные зажимы катушек соединены через добавочное сопротивление, вследствие чего разность потенциалов между концами катушек равна напряжению цепи (иногда весьма значительному, 240—600 в), а так как неподвижная и подвижная катушки находятся в непосредственной близости одна от другой, то создаются условия, благоприятные для пробоя изоляции катушек. Кроме того, между катушками, имеющими весьма различные потенциалы, будет наблюдаться электростатическое взаимодействие, могущее вызвать дополнительную погрешность.

11-3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВАТТМЕТР В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При переменном токе мы различаем:

1) мощность мгновенную, равную произведению мгновенных значений тока и напряжения, т. е.

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin (\omega t - \varphi),$$

изменяющуюся в течение периода;

2) мощность активную, среднюю за период, определяемую выражением

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = UI \cos \varphi;$$

3) мощность реактивную, определяемую выражением

$$Q = UI \sin \varphi.$$

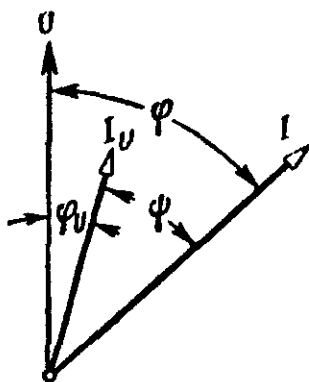


Рис. 11-6. Векторная диаграмма электродинамического ваттметра активной мощности.

Если включить электродинамический ваттметр в цепь с напряжением

$$u = U_m \sin \omega t$$

и током (рис. 11-6)

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi),$$

то ток неподвижной катушки ваттметра, равный току приемников, выразится уравнением

$$i = I_m \sin (\omega t - \varphi),$$

а ток подвижной катушки

$$i_U = \frac{U_m}{z_U} \sin (\omega t - \varphi_U) = I_{Um} \sin (\omega t - \varphi_U),$$

где z_U — полное сопротивление цепи напряжения ваттметра;

φ_U — угол сдвига между током I_U и напряжением U .

Угол поворота подвижной части ваттметра [см. (4-15)]

$$\alpha = k_2 I I_U \cos(\varphi - \varphi_U). \quad (11-5)$$

Если сопротивление цепи напряжения неизменно, то ток I_U пропорционален напряжению U и, следовательно,

$$\alpha = k_2 I \frac{U}{z_U} \cos(\varphi - \varphi_U) = k_3 I U \cos(\varphi - \varphi_U). \quad (11-6)$$

При $\varphi_U = 0$, т. е. при токе в параллельной цепи, совпадающем по фазе с напряжением,

$$\alpha = k_3 U I \cos \varphi = k_3 P. \quad (11-7)$$

Последнее выражение показывает, что угол поворота подвижной части ваттметра пропорционален активной мощности, а следовательно, по углу поворота можно судить о мощности цепи. Если, кроме того, полное сопротивление цепи напряжения равно активному сопротивлению, т. е. $z_U = r_U$, то показания ваттметра будут одинаковыми в цепях постоянного и переменного тока при одинаковой мощности той и другой цепей. Последнее обстоятельство весьма важно, так как дает возможность производить градуировку и поверку ваттметра на постоянном токе.

Угол сдвига между током и напряжением в параллельной цепи ваттметра вызывает погрешность, называемую угловой погрешностью ваттметра.

Показание ваттметра при наличии угла сдвига в его параллельной цепи согласно (11-6) будет:

$$P' = I U \cos(\varphi - \varphi_U).$$

При нулевом значении угла сдвига (11-7) показание ваттметра будет:

$$P = I U \cos \varphi.$$

Относительная угловая погрешность ваттметра

$$\begin{aligned} \gamma_P &= \frac{P' - P}{P} 100\% = \frac{I U \cos(\varphi - \varphi_U) - I U \cos \varphi}{I U \cos \varphi} 100\% = \\ &= \left[\frac{\cos(\varphi - \varphi_U)}{\cos \varphi} - 1 \right] 100\%. \end{aligned} \quad (11-8)$$

Воспользовавшись известной из тригонометрии формулой косинуса разности углов, получим:

$$\gamma_P = \left[\frac{\cos \varphi \cos \varphi_U + \sin \varphi \sin \varphi_U}{\cos \varphi} - 1 \right] 100\% = \\ = (\cos \varphi_U + \sin \varphi_U \operatorname{tg} \varphi - 1) 100\%;$$

так как φ_U мал, то

$$\cos \varphi_U \approx 1 \text{ и } \sin \varphi_U \approx \varphi_U;$$

следовательно,

$$\gamma_P = (\cos \varphi_U + \sin \varphi_U \operatorname{tg} \varphi - 1) 100\% = \\ = (1 + \varphi_U \operatorname{tg} \varphi - 1) 100\% = 100\% \varphi_U \operatorname{tg} \varphi.$$

Если φ_U выражать не в радианах, а в минутах, то, учитывая, что $1 \text{ рад} = 3438 \text{ мин}$, получаем:

$$\gamma_P = \frac{100\%}{3438} \varphi_U \operatorname{tg} \varphi = 0,0291\% \varphi_U \operatorname{tg} \varphi. \quad (11-9)$$

Из формулы (11-9) следует, что угловая погрешность ваттметра зависит не только от угла φ_U , но и от угла сдвига φ между током и напряжением в измеряемой цепи. Необходимо обратить внимание на то, что погрешность изменяется пропорционально $\operatorname{tg} \varphi$, и, следовательно, при больших углах φ она будет иметь очень большие значения. Так, например, при углах сдвига в $84^\circ 20'$ и $88^\circ 50'$ погрешности будут соответственно в 10 и 50 раз больше по сравнению с погрешностью при угле 45° .

Электродинамические ваттметры изготавливаются с одним или двумя номинальными токами последовательной цепи. В последнем случае неподвижная катушка ваттметра имеет обмотку, состоящую из двух одинаковых частей — секций, которые при нижнем значении номинального тока соединяются последовательно, а при верхнем значении тока, в 2 раза большем, соединяются параллельно. Это переключение секций производится при помощи рычажного переключателя или при помощи штепселей, или при помощи двух латунных планок, расположенных снаружи прибора (рис. 11-7).

Номинальный ток параллельной цепи ваттметра, как правило, составляет 30 ма.

Получение нескольких номинальных напряжений параллельной цепи ваттметра (150—300—600 в) достигается делением добавочного сопротивления на несколько секций подобно добавочным сопротивлениям у вольтметров (см. § 5-1).

В большинстве случаев параллельная цепь ваттметра имеет еще зажим с отметкой «1 000 ом», соответствующий

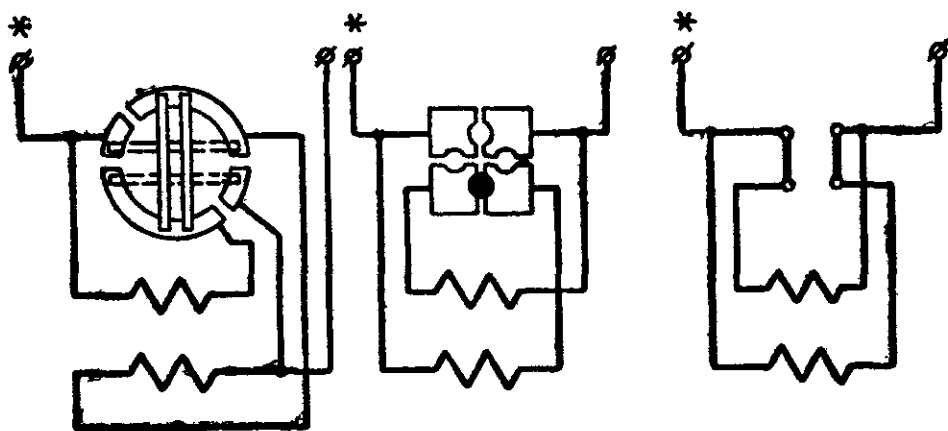


Рис. 11-7. Способы переключения последовательных обмоток ваттметра для получения двух пределов тока.

ющий напряжению 30 в. Он служит для присоединения наружных добавочных сопротивлений.

Параллельная цепь ваттметров, у которых допускается погрешность до $\pm 0,5\%$, состоит из подвижной катушки и последовательно



Рис. 11-8 Простейшая схема параллельной цепи электродинамического ваттметра.

соединенного безреактивного добавочного сопротивления из манганина (рис. 11-8).

У ваттметров с меньшими значениями допускаемых погрешностей параллельная цепь имеет более сложную схему с целью компенсации дополнительных погрешностей от температуры и частоты.

Компенсация влияния температуры у ваттметров отличается от рассмотренной в гл. 5 тем, что у ваттметров приходится компенсировать влияние температуры не только на сопротивление параллельной катушки, но и на модуль упругости материала пружин. Часто параллельная катушка с частью добавочного сопротивления шунтируется сопротивлением из манганина.

Дополнительная погрешность от частоты обусловлена тем, что при переходе от измерений в цепи постоянного тока к измерениям в цепи переменного тока появляется угол сдвига φ_U между током подвижной катушки I_U и напряжением U на зажимах параллельной цепи ваттметра, величина которого изменяется с изменением частоты. Как следует из изложенного выше, этот угол должен быть равен нулю. У ваттметра классов точности 1—1,5, а иногда и 0,5 вследствие применения достаточно большого безиндукционного добавочного сопротивления, включенного последовательно с подвижной катушкой, можно этот угол получить достаточно малым. У ваттметров класса точности 0,2, а иногда класса 0,5 получение угла $\varphi_U = 0$ достигается шунтированием части добавочного сопротивления емкостью (рис. 11-9).

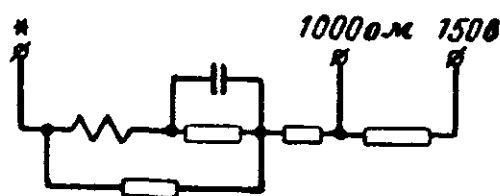


Рис. 11-9. Схема параллельной цепи электродинамического ваттметра с компенсацией угловой погрешности.

Для защиты от внешнего магнитного поля применяется экранирование (рис. 4-17) или астатический измерительный механизм (рис. 4-16).

При включении ваттметра в цепь переменного тока необходимо обращать внимание на генераторные зажимы ваттметра с тем, чтобы обеспечить правильное включение ваттметра, при котором положительные направления токов в катушках ваттметра соответствуют направлениям от генераторных зажимов к негенераторным.

В противном случае, поменяв местами зажимы последовательной обмотки, получим изменение фазы тока в ней на 180° (рис. 11-10, а) или, поменяв местами зажимы параллельной цепи ваттметра, получим изменение фазы напряжения на 180° (рис. 11-10, б).

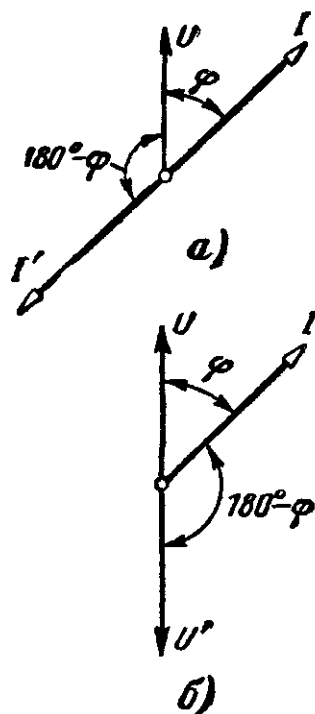


Рис. 11-10 Векторные диаграммы ваттметра при различных включениях его обмоток. а — изменение фазы тока на $\frac{1}{2} T$; б — изменение фазы напряжения на $\frac{1}{2} T$.

В том и другом случаях угол сдвига между током последовательной цепи ваттметра и напряжением на зажимах его параллельной цепи будет $180^\circ - \varphi$ и угол поворота подвижной части ваттметра будет отрицательным, так как

$$\alpha = k_s UI \cos(180^\circ - \varphi) = -k_s UI \cos \varphi. \quad (11-10)$$

Иначе говоря, подвижная часть ваттметра отклонится в противоположную сторону и отсчет по прибору будет невозможен.

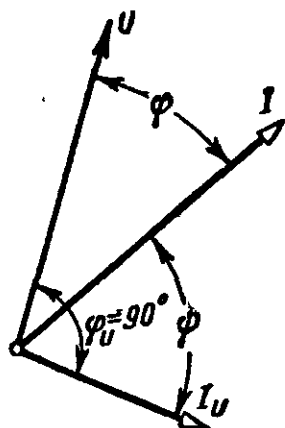


Рис. 11-11. Векторная диаграмма электродинамического ваттметра реактивной мощности.

На шкалах ваттметров классов 0,2 и 0,5 цифрами помечаются только числа делений шкалы. Для определения мощности по показанию таких ваттметров необходимо определить при той или иной схеме соединения обмоток его постоянную C_p , т. е. мощность, соответствующую отклонению стрелки на одно деление шкалы.

Такие ваттметры всегда градуируются так, что при номинальном токе I_n , номинальном напряжении U_n и $\cos = 1$ дают полное отклонение стрелки α_n .

Поэтому при определении постоянной ваттметра для данной схемы следует произведение номинального тока на номинальное напряжение делить на число делений шкалы, т. е. определять ее по формуле

$$C_p = \frac{U_n I_n}{\alpha_n}. \quad (11-11)$$

Если ток в параллельной катушке электродинамического ваттметра сдвинуть по фазе от напряжения на зажимах параллельной цепи ваттметра на угол 90° ($\varphi_U = 90^\circ$, рис. 11-11), то угол поворота подвижной части ваттметра

$$\alpha = k_s IU \cos(90^\circ - \varphi) = k_s IU \sin \varphi = k_s Q, \quad (11-12)$$

т. е. в этом случае угол отклонения подвижной части ваттметра будет пропорционален реактивной мощности.

Сдвиг между током подвижной катушки ваттметра и напряжением цепи, равный 90° , может быть получен при

помощи одной из искусственных схем, например схемы на рис. 11-12а. Векторная диаграмма для этой схемы дана на рис. 11-12б.

На рис. 11-13 даны схема соединения обмоток и схема включения в сеть электродинамического ваттметра активной и реактивной мощностей. Если поставить ножи переключателя в положение *aa*, то ваттметр изме-

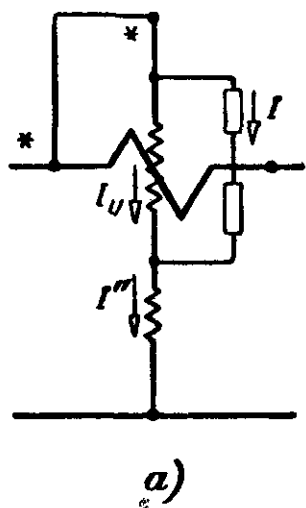


Рис. 11-12а. Схема для получения тока в параллельной катушке ваттметра, сдвинутого по фазе на 90° относительно напряжения.

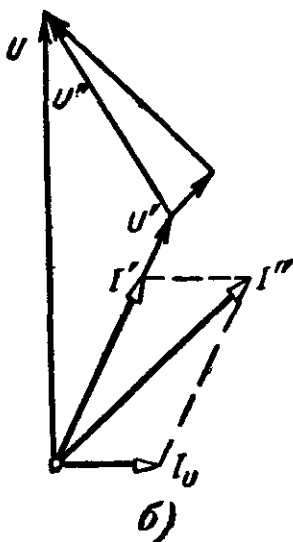


Рис. 11-12б. Векторная диаграмма параллельной цепи, изображенной на рис. 11-12а.

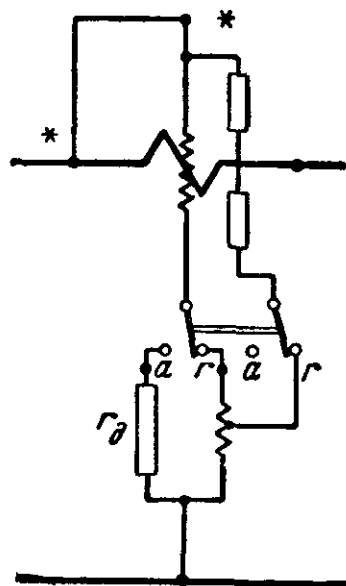


Рис. 11-13. Схема электродинамического ваттметра активной и реактивной мощностей.

ряет активную мощность; если ножи переключателя поставить в положение *rr*, то ваттметр будет измерять реактивную мощность.

Существенным недостатком электродинамических ваттметров реактивной мощности является зависимость показаний от частоты, так как с изменением частоты меняются реактивные сопротивления параллельной цепи ваттметра, а следовательно, и сдвиг фаз между напряжением цепи и током параллельной катушки.

Из положительных свойств электродинамических ваттметров следует отметить: высокую точность и пригодность их для измерений в цепях постоянного и переменного тока как промышленной (стандартной), так и повышенной частоты.

Из недостатков отметим: слабое магнитное поле прибора и незначительный вращающий момент; зависи-

мость показаний от внешних магнитных полей; чувствительность к перегрузкам; большая мощность потерь и высокая стоимость.

На рис. 11-14 дана схема соединения ваттметра типа АСТ-Д. Номинальный ток его $I_{\text{н}}=5 \text{ а}$, номинальное напряжение $U_{\text{н}}=150 \text{ в}$. Увеличение номинального напряжения достигается применением внешнего добавочного со-

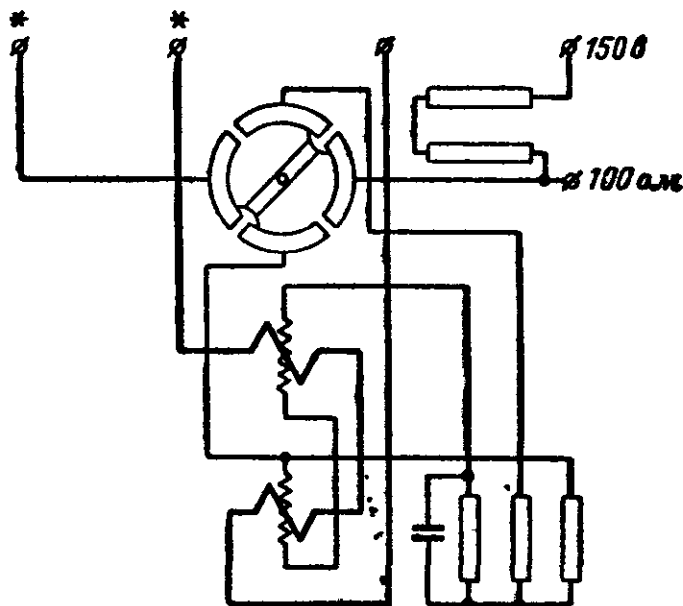


Рис 11-14. Схема соединения ваттметра типа АСТ-Д

противления (типа ДВТ), присоединяемого к зажиму «1 000 ом». Переключатель в параллельной цепи ваттметра дает возможность изменять на половину периода фазу тока в параллельной катушке ваттметра.

Класс точности ваттметра 0,5. Шкала ваттметра имеет 150 делений.

Постоянная ваттметра

$$C_p = \frac{U_{\text{н}} I_{\text{н}}}{\alpha_{\text{н}}} = \frac{150 \cdot 5}{150} = 5 \text{ вт/дел.}$$

Кроме ваттметров типа АСТ-Д, тот же завод «Точ-электроприбор» изготавливает электродинамические ваттметры типа Д533 класса точности 0,2 и типа Д57 класса точности 0,1.

Для измерения мощности в цепях с большим углом сдвига (с малым значением $\cos \varphi$) завод изготавливает электродинамические ваттметры типов Д542 и Д522, пер-

вый — класса точности 0,5, второй — 1. Постоянная ваттметра для двух последних приборов определяется по формуле

$$C_P = \frac{U_H I_H \cos \varphi_H}{\alpha_H}.$$

11-4. ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЙ ВАТТМЕТР

Измерительный механизм ферродинамической системы рассмотрен в § 4-4.

В ферродинамическом ваттметре, так же как и в электродинамическом, неподвижная катушка используется обычно как катушка тока, а подвижная — как катушка напряжения.

Присутствие ферромагнитного материала, с одной стороны, вызывает: 1) увеличение магнитных потоков и вращающего момента прибора, что дает возможность изготовить его подвижную часть более прочной; 2) уменьшение н. с., числа витков обмоток и мощности потерь; 3) уменьшение влияния внешних магнитных полей. С другой стороны, вследствие применения ферромагнитного материала появляются слагающие основной погрешности от нелинейности кривой намагничивания, от вихревых токов, от гистерезиса.

Наличие стального сердечника и потерь в нем вызывает сдвиг по фазе последовательного магнитного потока Φ_1 от тока этой цепи I на угол ε , что и показано на векторной диаграмме (рис. 11-15). В соответствии с этим выражения угла поворота подвижной части (11-5) и (11-6) изменяются и принимают вид:

$$\alpha = k_2 I I_U \cos(\varphi - \varphi_U + \varepsilon) \quad (11-13)$$

и

$$\alpha = k_3 I U \cos(\varphi - \varphi_U + \varepsilon). \quad (11-14)$$

Если выполнить условие $\varphi_U = \varepsilon$, то

$$\alpha = k_3 I U \cos(\varphi - \varphi_U - \varepsilon) = k_3 I U \cos \varphi = k_3 P$$

и, следовательно, угловая погрешность ваттметра будет равна нулю.

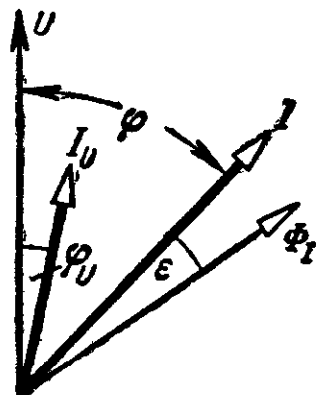


Рис 11-15. Векторная диаграмма ферродинамического ваттметра.

В ферродинамических ваттметрах угол ϵ обычно больше, чем φ_U .

Для уменьшения угловой погрешности угол φ_U увеличивают до значения ϵ путем увеличения индуктивности параллельной цепи, применяя полностью или частично,

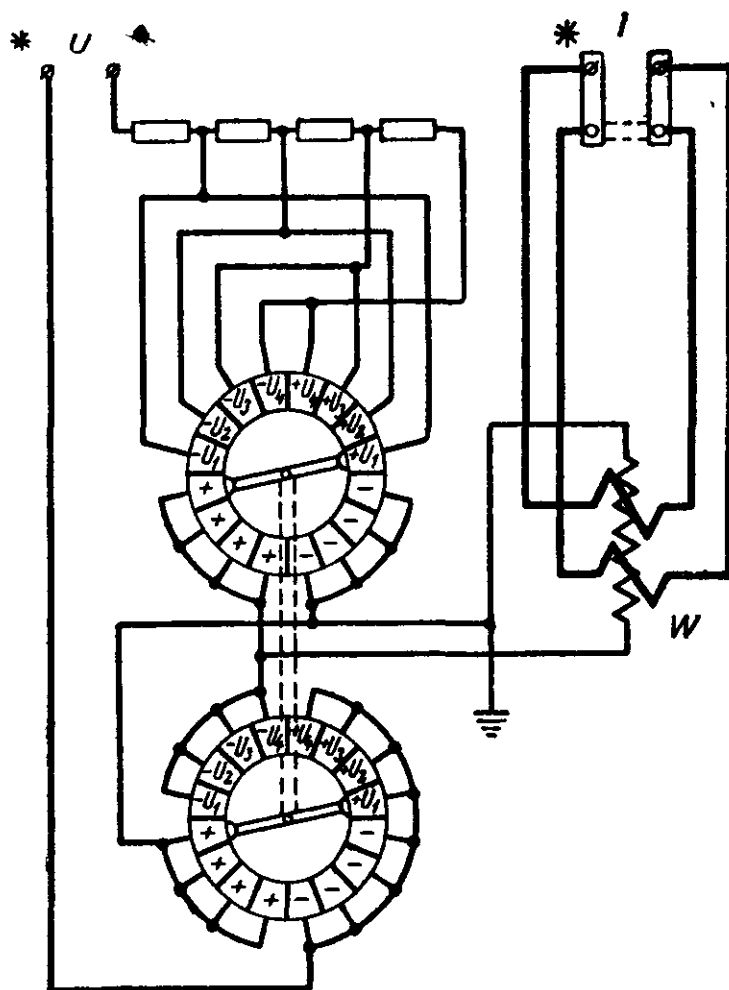


Рис. 11-16. Схема ферродинамического ваттметра типа Д-539.

как, например, у ваттметров типа Д539, не бифилярную, а обычную намотку добавочных сопротивлений.

Погрешности, связанные с применением стали, ограничивают точность этих ваттметров классом 1,5. Однако, применяя пермаллой для изготовления сердечника, как, например, в ваттметрах типа Д539, получают ваттметры класса точности 0,5.

На рис. 11-16 дана схема ваттметра типа Д539 завода «Точэлектроприбор» для постоянного и переменного тока частоты 45—65—500 гц.

Ваттметр имеет четыре номинальных напряжения

30—75—150—300 или 75—150—300—600 в и два номинальных тока. Наименьшие значения номинальных токов 10—20 *ма*, наибольшие 5—10 *а*.

Применение пермаллоя для сердечников и растяжек для крепления подвижной части обеспечили возможность снизить номинальный ток в параллельной цепи до 3 *ма*, а мощность последовательной катушки до 0,15 *вт*.

11-5. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Большинство щитовых ваттметров изготавливается на номинальный ток 5 *а* и номинальное напряжение 150—250 *в*.

Если необходимо измерять мощность в цепях с большими токами, то для расширения пределов измерения ваттметра применяют измерительные трансформаторы тока.

Если необходимо измерять мощности в цепях высокого напряжения, то применяют одновременно трансформаторы тока и трансформаторы напряжения.

а) Измерение мощности с применением трансформатора тока

Схема соединения для этого случая дана на рис. 11-17а. Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно с приемниками энергии. К вторичной обмотке трансформатора подключают последовательно соединенные амперметр и последовательную обмотку ваттметра. Параллельная обмотка ваттметра и вольтметр, соединенные параллельно, включаются на напряжение первичной цепи.

Для того чтобы генераторные зажимы ваттметра были при одном потенциале, один зажим вторичной обмотки трансформатора тока присоединяется к зажиму первичной обмотки трансформатора и к нему же присоединяется генераторный зажим параллельной обмотки ваттметра. Поэтому в схеме измерения мощности с одним трансформатором тока нельзя заземлять вторичную обмотку трансформатора тока,

Мощность первичной цепи, подлежащая измерению,

$$P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1.$$

Мощность, измеряемая ваттметром (рис. 11-176),

$$P_W = I_2 U_1 \cos \varphi_2.$$

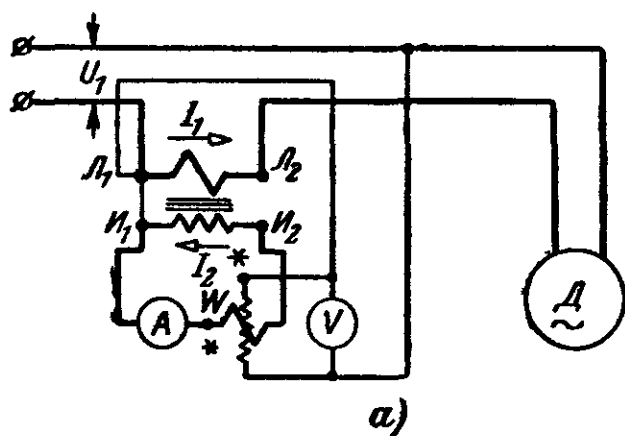


Рис. 11-17а. Схема соединения для измерения мощности в цепи однофазного тока с применением трансформатора тока.

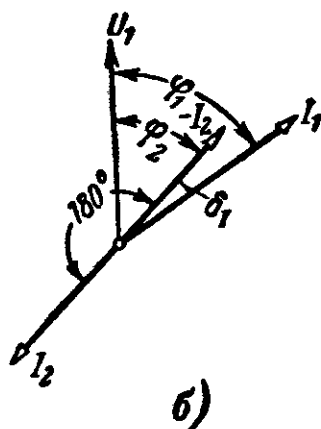


Рис. 11-17б. Векторная диаграмма для цепи, изображенной на рис. 11-17а.

Умножив последнее выражение на номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока k_{HI} , получим:

$$P'_1 = P_W k_{HI} = I_2 k_{HI} U_1 \cos \varphi_2 = I_2 k_{HI} U_1 \cos (\varphi_1 - \delta).$$

Так как $I_2 k_{HI} \approx I_1$ и $\varphi_1 - \delta \approx \varphi_1$ (вследствие малости δ), то

$$P'_1 = P_W k_{HI} \approx I_1 U_1 \cos \varphi_1 = P_1. \quad (11-15)$$

Из формулы (11-15) следует, что для определения мощности первичной цепи показания ваттметра необходимо умножить на номинальный коэффициент трансформации трансформатора тока.

Если ваттметр предназначен для постоянной совместной работы с данным трансформатором, то для удобства на шкале ваттметра при ее изготовлении наносятся величины мощности первичной цепи и на шкале делается пометка, с каким номинальным коэффициентом трансформации выполнена градуировка.

Погрешность в измерении мощности, обусловленная применением трансформатора тока, зависит от погрешности в коэффициенте трансформации и угловой погрешности трансформатора.

Обозначив

$$P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1 \text{ и } P''_1 = I_1 U_1 \cos (\varphi_1 - \delta),$$

можно написать выражение для погрешности мощности, обусловленной угловой погрешностью трансформатора тока:

$$\begin{aligned} \gamma_P &= \frac{P''_1 - P_1}{P_1} 100\% = \frac{I_1 U_1 \cos (\varphi_1 - \delta) - I_1 U_1 \cos \varphi_1}{I_1 U_1 \cos \varphi_1} 100\% = \\ &= \left[\frac{\cos (\varphi_1 - \delta)}{\cos \varphi_1} \right] 100\%. \end{aligned}$$

По аналогии с (11-8) и (11-9) получим

$$\gamma_P = 0,0291\% \delta \operatorname{tg} \varphi_1. \quad (11-16)$$

Из формулы (11-16) следует, что погрешность измерения мощности, обусловленная угловой погрешностью трансформатора, как и (11-9), зависит не только от δ , но и от угла сдвига между током и напряжением в первичной цепи.

б) Измерение мощности с применением трансформатора тока и трансформатора напряжения

Схема соединения приборов для этого случая дана на рис. 11-18, а.

Первичная обмотка трансформатора тока включается последовательно с приемниками энергии; к зажимам вторичной обмотки трансформатора подключаются амперметр и последовательная обмотка ваттметра.

Параллельная обмотка ваттметра и вольтметр подключаются к зажимам вторичной обмотки трансформатора напряжения, первичная обмотка которого включена на напряжение первичной цепи.

Вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения и кожухи трансформаторов заземляются.

Мощность первичной цепи, подлежащая определению,

$$P_1 = I_1 U_1 \cos \varphi_1.$$

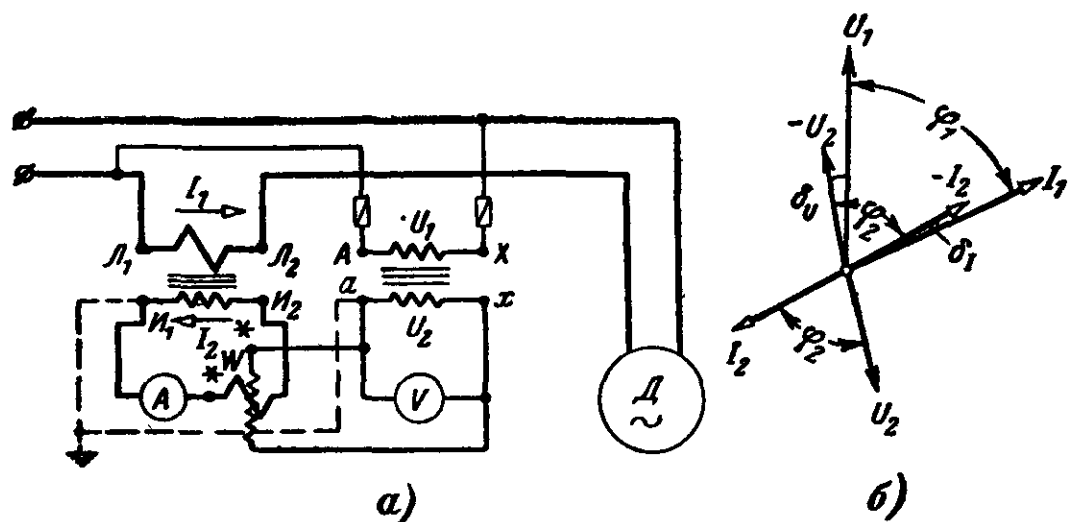


Рис. 11-18. Измерение мощности в высоковольтной цепи однофазного тока с применением измерительных трансформаторов.
а — схема соединения; б — векторная диаграмма.

Мощность, измеряемая ваттметром (рис. 11-18, б) будет:

$$P_w = I_2 U_2 \cos \varphi_2.$$

Умножив последнее выражение на номинальные коэффициенты трансформации трансформатора тока и трансформатора напряжения, получим:

$$\begin{aligned} P'_1 &= P_w k_{HI} k_{HU} = I_2 k_{HI} U_2 k_{HU} \cos \varphi_2 = \\ &= I_2 k_{HI} U_2 k_{HU} \cos (\varphi_1 + \delta_U - \delta_I). \end{aligned}$$

Так как

$$I_2 k_{HI} \approx I_1; \quad U_2 k_{HU} \approx U_1$$

и вследствие малости δ_U и δ_I

$$\varphi_1 + \delta_U - \delta_I \approx \varphi_1,$$

то можно написать:

$$P'_1 = P_w k_{HI} k_{HU} \approx I_1 U_1 \cos \varphi_1 = P_1. \quad (11-17)$$

Последнее выражение показывает, что для определения мощности первичной цепи показания ваттметра необходимо множить на номинальные коэффициенты трансформации трансформаторов тока и напряжения.

Погрешность в измерении мощности, обусловленная применением трансформаторов, зависит от погрешностей

коэффициентов трансформации, угловых погрешностей трансформаторов и угла сдвига фаз между током и напряжением в первичной цепи.

При включении ваттметров через измерительные трансформаторы весьма важно считаться с тем обстоятельством, что вектор вторичного тока в трансформаторе тока повернут относительно вектора первичного тока на угол, весьма близкий к 180° . В трансформаторе напряжения вектор вторичного напряжения повернут относительно вектора первичного напряжения на угол, близкий к 180° .

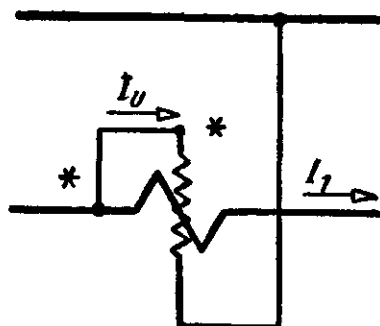


Рис. 11-19. Схема непрямого включения ваттметра.

При включении ваттметра через измерительные трансформаторы последовательную цепь следует всегда включать таким образом, чтобы ток, идущий по этой обмотке, с точностью до δ_I совпадал по фазе с током первичной цепи, а параллельную цепь ваттметра следует включать так, чтобы напряжение, приложенное к ней, с точностью до δ_U совпадало по фазе с первичным напряжением.

На рис. 11-19 дана правильная схема включения ваттметра в цепь переменного тока, при котором стрелка ваттметра отклоняется вдоль шкалы слева направо. На этой схеме стрелками указаны положительные направления токов в обмотках. На рис. 11-20,а дана правильная, а на рис. 11-20,б — неправильная схема включения того же ваттметра через трансформатор тока.

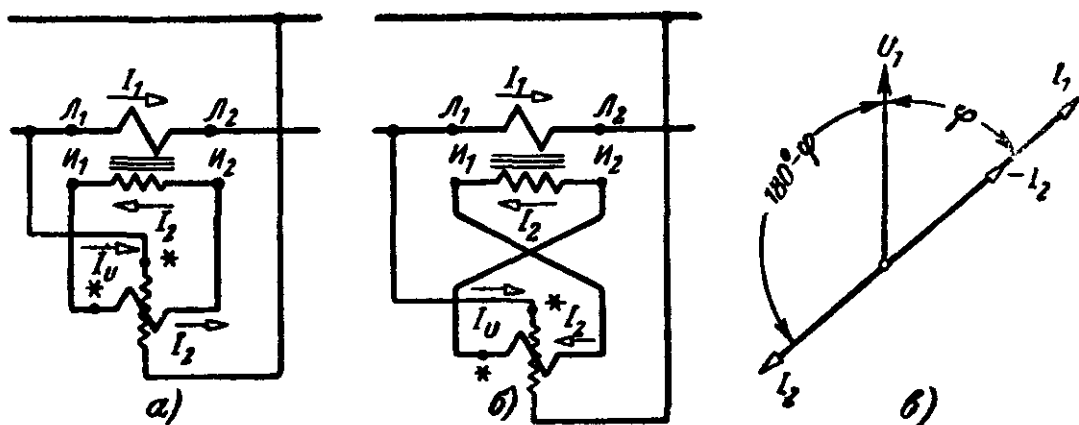


Рис. 11-20. Схема включения ваттметра через трансформатор тока. а — правильная; б — неправильная; в — векторная диаграмма к ним.

Стрелками указаны положительные направления токов в обмотках.

Неправильность включения заключается в том, что генераторный зажим последовательной обмотки ваттметра приключен не к зажиму I_1 , а к зажиму I_2 и негенераторный зажим последовательной обмотки приключен к зажиму I_1 , а не к зажиму I_2 . Из-за такого включения фаза тока в последовательной обмотке изменилась на половину периода, вектор тока повернулся на 180° (рис. 11-20, в). В этом случае мощность, измеряемая ваттметром, равна

$$P_w = I_2 U_1 \cos(180^\circ - \varphi) = -I_2 U_1 \cos \varphi,$$

и подвижная часть ваттметра отклоняется в обратную сторону — от нуля влево.

Все сказанное относительно неправильного подключения последовательной обмотки ваттметра к трансформатору тока относится также к параллельной цепи ваттметра и трансформатору напряжения.

Особенно важно знать разметку концов обмоток измерительных трансформаторов при сборке схем измерения мощности в трехфазных сетях, так как в таких случаях часто при неправильном присоединении трансформаторов изменяется только показание ваттметра, а не направление отклонения его подвижной части.

Для облегчения монтажа схем зажимы трансформаторов тока, согласно общесоюзному стандарту, размечаются буквами L_1 и L_2 , I_1 и I_2 , которые и даны на приведенных схемах.

Зажимы трансформаторов напряжений размечаются буквами A , X , a , x .

В тех случаях, когда концы обмоток трансформатора не размечены, разметка может быть произведена следующим образом.

К зажимам одной из обмоток трансформатора (рис. 11-21, а) присоединяют магнитоэлектрический прибор, а к зажимам второй обмотки — аккумулятор. Если при замыкании рубильника P стрелка прибора отклонится по шкале, а не в обратную сторону, за нуль шкалы, то это значит, что плюс элемента и плюс прибора соединены с одноименными зажимами трансформатора, т. е. или с зажимами L_1 и I_1 , или с зажимами L_2 и I_2 .

В тех случаях, когда имеется трансформатор с раз-

меченными зажимами, разметку зажимов другого трансформатора, не имеющего разметки, можно произвести, включая трансформаторы по схеме, данной на рис. 11-21б или в.

При соединении по схеме, показанной на рис. 11-21,б, ток I_3 равен разности токов I_1 и I_2 .

При соединении по другой схеме (рис. 11-21,в) напряжение U_3 равно разности напряжений U_1 и U_2 .

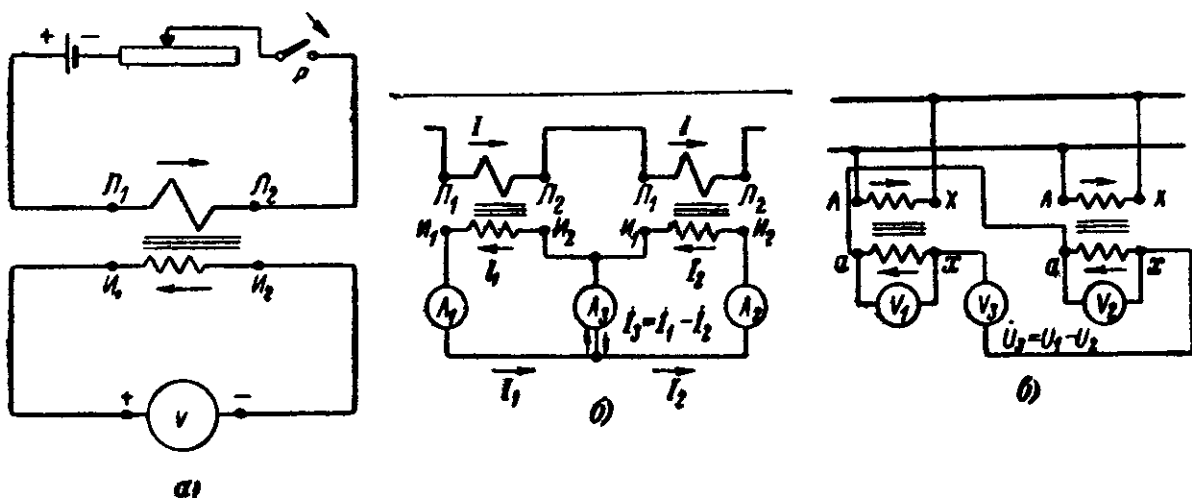


Рис. 11-21. Схемы для разметки зажимов измерительных трансформаторов.

а — при помощи аккумулятора; б — при помощи трансформатора тока, с размеченными зажимами, в — при помощи трансформатора напряжения.

11-6. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЧЕТЫРЕХПРОВОДНЫХ ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

В цепях трехфазного тока с нулевым проводом приемники энергии включаются по схеме, данной на рис. 11-22.

В этом случае активная мощность трехфазной цепи может быть выражена как сумма мощностей отдельных фаз.

Обозначая P — активную мощность трехфазной цепи, P_A , P_B , P_C — мощности отдельных фаз, можно написать:

$$P = P_A + P_B + P_C = I_A U_A \cos \varphi_A + I_B U_B \cos \varphi_B + I_C U_C \cos \varphi_C.$$

Из написанного выражения следует, что для измерения активной мощности необходимо включить в цепь три ваттметра (рис. 11-22) таким образом, чтобы каждый

из них измерял мощность отдельной фазы, а затем следует сложить их показания.

Для измерения мощности четырехпроводной цепи чаще применяют трехэлементные ваттметры.

На рис. 4-20 дана схема устройства трехэлементного ферродинамического ваттметра. Прибор имеет три непо-

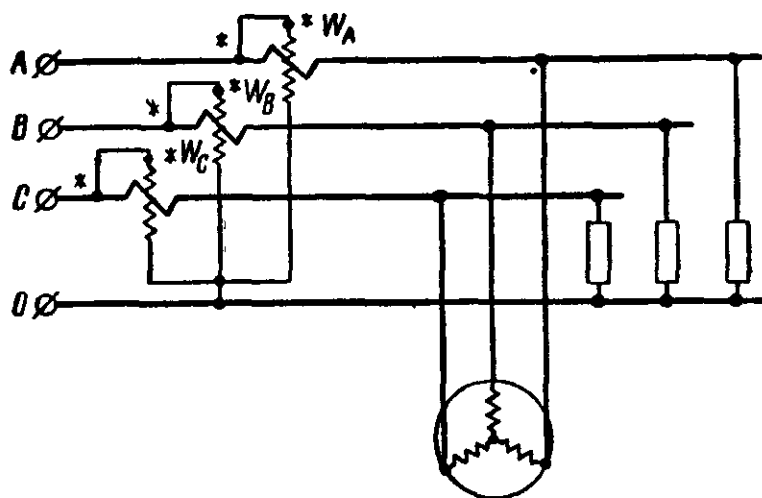


Рис. 11-22. Схема включения ваттметров в четырехпроводную цепь трехфазного тока.

движные катушки и три подвижные, укрепленные на одной оси с указательной стрелкой.

При включении такого ваттметра по схеме на рис. 11-22 вращающий момент, действующий на каждую из подвижных катушек, будет пропорционален мощности соответствующей фазы, а результирующий вращающий момент, равный сумме отдельных моментов, будет пропорционален активной мощности четырехпроводной цепи трехфазного тока. Угол поворота подвижной части будет пропорционален активной мощности четырехпроводной цепи трехфазного тока.

Перед включением трехэлементного ваттметра в цепь следует всегда выяснять, какие обмотки ваттметра принадлежат первому, второму и третьему элементам.

При отсутствии ясности в этом вопросе возможно неправильное соединение ваттметра.

Перед включением ваттметра необходимо также проверить генераторные зажимы каждой из обмоток, так как перемена местами зажимов какой-либо обмотки будет означать изменение фазы тока этой обмотки на 180° , что соответствует изменению направления вращающего момента соответствующего элемента.

Для проверки или определения зажимов, принадлежащих последовательным или параллельным обмоткам ваттметра, поступают

следующим образом. Любой из зажимов ваттметра соединяют с одним полюсом рубильника (рис. 11-23); к другому полюсу рубильника подключают один из зажимов вольтметра; второй зажим вольтметра при помощи соединительного проводника поочередно подключают к остальным зажимам ваттметра.

Если два проводника, подключенных к зажимам ваттметра, оказываются соединенными с параллельной цепью ваттметра, то вольтметр покажет напряжение, меньшее напряжения сети, так как часть напряжения ляжет на параллельную цепь ваттметра. Если сопротивление параллельной цепи ваттметра примерно равно сопротивлению вольтметра, то вольтметр покажет половину напряжения сети. Если два проводника окажутся присоединенными к генераторным зажимам двух параллельных цепей ваттметра, соединенных между собой зажимом, нормально присоединяемым к нулевому проводу, то последовательно с вольтметром будут соединены две цепи ваттметра и, следовательно, вольтметр даст соответственно меньшее показание.

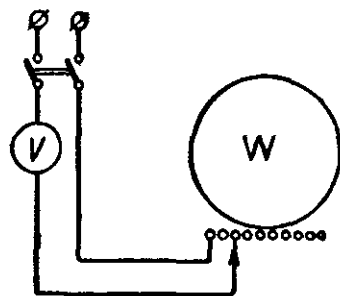


Рис. 11-23. Схема для определения зажимов ваттметра.

Если два проводника окажутся соединенными с последовательной цепью ваттметра, то вольтметр покажет полное напряжение сети, так как падение напряжения на последовательной цепи ваттметра в этом случае будет незначительным (доли вольта). Если же два проводника, соединенных с ваттметром, будут подключены к разным обмоткам ваттметра, то вольтметр показаний не даст, так как в этом случае цепь вольтметра будет разомкнута.

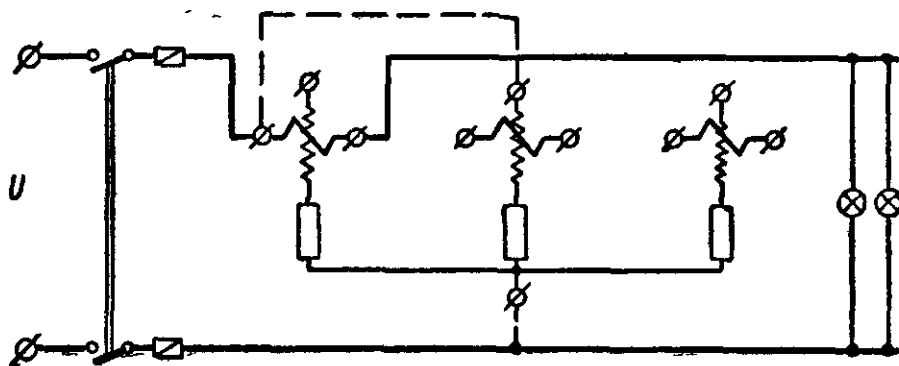


Рис. 11-24. Схема для определения обмоток, принадлежащих одному элементу.

Выяснив таким образом расположение зажимов каждой из цепей и генераторных зажимов параллельных цепей ваттметра, определим при помощи пробного включения цепи, принадлежащие каждому из элементов, и генераторные зажимы последовательных цепей.

Пробное включение производится следующим образом.

Возьмем произвольно последовательную цепь, принадлежащую какому-либо элементу ваттметра, и, включив последовательно с ней какое-либо сопротивление (одну-две электрические лампы), подадим

на эту цепь напряжение; тогда в последовательной цепи ваттметра будет проходить ток. Возьмем затем произвольно какую-либо параллельную цепь ваттметра и включим ее на напряжение, как показано на рис. 11-24. Если эта параллельная цепь принадлежит элементу, в последовательной цепи которого нет тока, то подвижная часть ваттметра не будет отклоняться (или даст незначительное отклонение). Если же взятая нами параллельная цепь принадлежит к тому же элементу, что и последовательная, то подвижная часть ваттметра отклонится на угол, соответствующий мощности, потребляемой лампами.

Этим же пробным включением попутно проверяются и генераторные зажимы последовательной цепи ваттметра. Если при указанном включении подвижная часть ваттметра отклонилась в правильную сторону (от нуля вправо), то это и означает, что генераторный зажим последовательной и генераторный зажим параллельной цепи соединены вместе и подключены к одному проводу.

11-7. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХПРОВОДНЫХ ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА ПРИ РАВНОМЕРНОЙ НАГРУЗКЕ ФАЗ

При симметричной системе напряжений и равномерной нагрузке фаз (силовая нагрузка — двигатель) можно измерять мощность одной фазы, а затем, умножив ее на 3, получить мощность трехфазной цепи.

При равномерной нагрузке могут иметь место несколько случаев.

а) Если трехфазная цепь имеет доступную нулевую точку, то измерение производится одним однофазным ваттметром, включенным по схеме на рис. 11-25.

Рис. 11-25 Схема соединения однофазного ваттметра для измерения мощности трехфазного тока при равномерной нагрузке и доступной нулевой точке.

В этом случае через последовательную обмотку ваттметра идет фазный ток I_{ϕ} , и параллельная обмотка находится под фазным напряжением U_{ϕ} ; следовательно, показания ваттметра

$$P_w = P_{\phi} = I_{\phi} U_{\phi} \cos \varphi,$$

где P_{ϕ} — активная мощность одной фазы;

φ — угол сдвига между фазным током и фазным напряжением.

Активная мощность трехфазной цепи определяется показанием ваттметра, умноженным на 3, т. е.

$$P = 3P_W = 3P_\Phi = 3I_\Phi U_\Phi \cos \varphi = \sqrt{3} I_L U_L \cos \varphi,$$

где P — активная мощность трехфазной цепи.

б) Если при равномерной нагрузке нулевая точка недоступна или если приемники энергии соединены в трес-

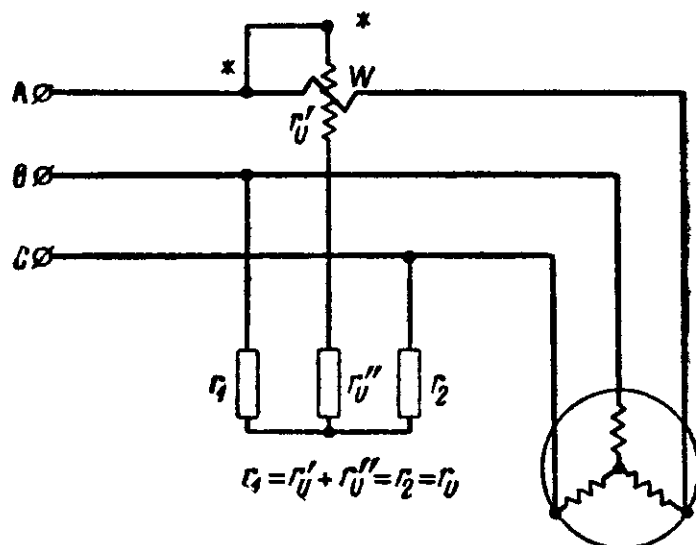


Рис. 11-26 Схема соединения ваттметра с искусственной нулевой точкой для измерения мощности трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз.

угольник, то создается искусственная нулевая точка, как это указано на рис. 11-26.

Нулевая точка образуется двумя сопротивлениями, r_1 и r_2 , равными каждое в отдельности сопротивлению параллельной цепи однофазного ваттметра r_U , т. е. должно быть выполнено условие

$$r_1 = r_2 = r_U.$$

В этом случае при включении ваттметра с искусственной нулевой точкой по схеме на рис. 11-26 в параллельной цепи будет фазное напряжение U_Φ , а через последовательную цепь ваттметра будет проходить фазный ток I_Φ , и, следовательно, ваттметр измерит мощность одной фазы, т. е.

$$P_W = P_\Phi = I_\Phi U_\Phi \cos \varphi.$$

Умножая показание ваттметра на 3, получаем мощность трехфазной цепи, т. е.

$$P = 3P_W = 3P_\phi = 3I_\phi U_\phi \cos \varphi = \sqrt{3} I_\pi U_\pi \cos \varphi.$$

Если ваттметр предназначен для постоянной работы с определенной искусственной нулевой точкой, то на

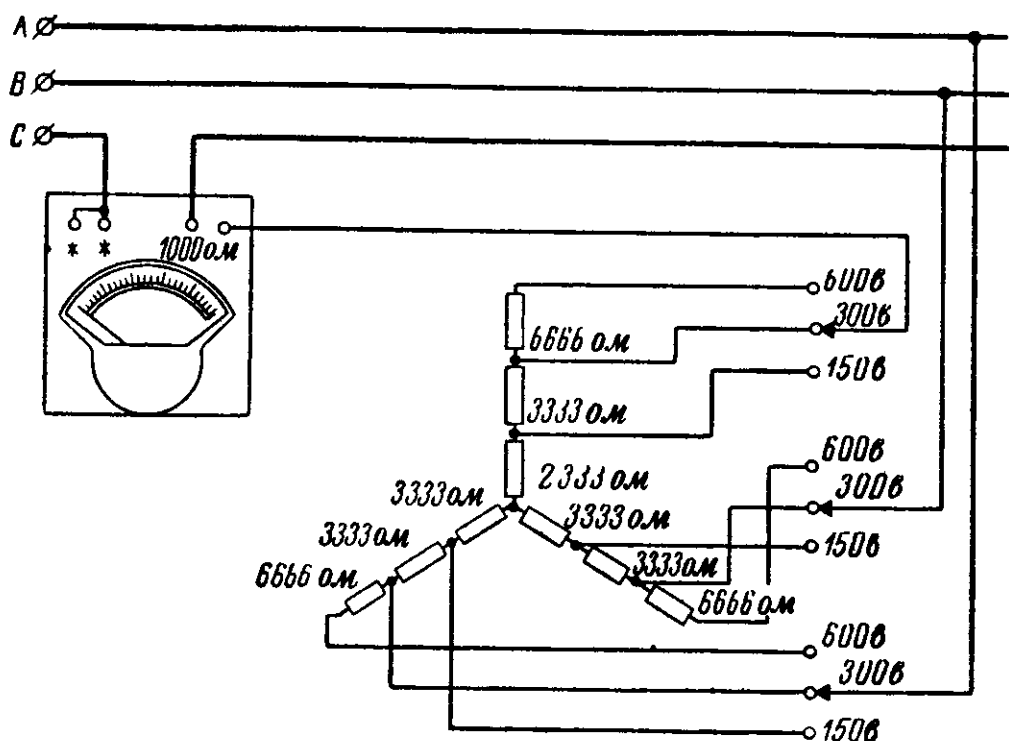


Рис 11 27 Схема соединения контрольного ваттметра с искусственной нулевой точкой

шкале его наносится непосредственно мощность трех-
фазной цепи.

Рассмотрим применение искусственной нулевой точки (рис. 11-27) совместно с ваттметром АСТ-Д, изображенным на рис. 11-14. Оно часто используется для измерения мощности в цепях трехфазного тока

Допустим, что нам нужно измерить мощность в цепи трехфазного тока с линейным напряжением 220 в, причем известно, что ток I не превосходит 5 а.

Если бы ток цепи был больше 5 а, то пришлось бы для расширения предела измерения ваттметра применить измерительный трансформатор тока с соответствующим коэффициентом трансформации.

Если линейное напряжение $U=220$ в, то фазное напряжение равно.

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\pi}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ в.}$$

Так как параллельная цепь ваттметра рассчитана на номинальный ток $I_{УН}=0,03$ а, то сопротивление каждой из фаз нулевой точки должно быть не меньше

$$\frac{U_{\phi}}{I_{УН}} = \frac{127}{0,03} = 4\ 250\ \text{ом}.$$

Рассматривая рис. 11-27, видим, что сопротивление одной фазы искусственной нулевой точки на 1 000 ом меньше двух других. Это делается для того, чтобы после включения в эту фазу параллельной обмотки ваттметра ($r_U=1\ 000$ ом) сопротивление всех фаз было одинаковым

Для нашего случая наиболее подходящим будет сопротивление 6 666 ом. Выбрав указанное сопротивление, соединим приборы так, как показано на рис. 11-27.

Теперь определим постоянную ваттметра, т. е. мощность трехфазной цепи, соответствующую отклонению ваттметра на одно деление шкалы. Номинальный ток ваттметра $I_{\text{н}}=5$ а. Следовательно, при номинальном токе в цепи и напряжении $I_{УН}=0,03$ а и сопротивлении каждой фазы нулевой точки 6 666 ом номинальное фазное напряжение будет равно:

$$U_{\phi.\text{н}} = I_{УН} \cdot 6\ 666 = 0,03 \cdot 6\ 666 = 199,98 \approx 200\ \text{в},$$

а номинальная мощность трехфазной системы

$$P_{\text{н}} = 3I_{\text{н}}U_{\phi.\text{н}} = 3 \cdot 5 \cdot 200 = 3\ 000\ \text{вт}.$$

Но так как число делений шкалы ваттметра $n_{\text{н}}=150$, то постоянная будет равна:

$$C_P = \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = \frac{3\ 000}{150} = 20\ \text{вт/дел}.$$

На основании приведенных рассуждений постоянную можно выразить формулой

$$C_P = \frac{3I_{\text{н}}r_U I_{УН}}{n_{\text{н}}}.$$

Если ваттметр при включении отклонился на 50 делений ($n=50$), то это значит, что мощность цепи трехфазного тока равна:

$$P = C_P n = 20 \cdot 50 = 1\ 000\ \text{вт}.$$

в) При равномерной нагрузке, например при измерении мощности, получаемой двигателем, обмотки которого соединены треугольником, иногда применяется схема включения ваттметра, данная на рис. 11-28.

Как видно из схемы, через последовательную цепь ваттметра проходит фазный ток, а параллельная цепь

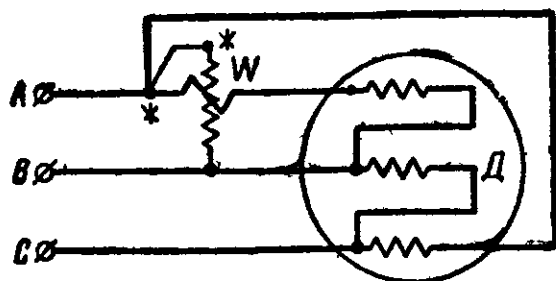


Рис. 11-28. Схема соединения однофазного ваттметра для измерения мощности трехфазного тока при соединении приемников энергии треугольником и равномерной нагрузке фаз.

находится под фазным напряжением. В этом случае мощность, измеряемая ваттметром, равна мощности одной фазы.

Умножая показания ваттметра на 3, получаем активную мощность двигателя.

г) Ваттметр, соединенный по схеме, показанной на рис. 11-29,а при включении параллельной цепи на напряжение U_{AC} (положение переключателя 1), измерит мощность (рис. 11-29,б)

$$P'_w = I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos(30^\circ - \varphi).$$

При включении параллельной цепи на напряжение U_{AB} мощность, измеряемая ваттметром, будет:

$$P''_w = I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos(30^\circ + \varphi).$$

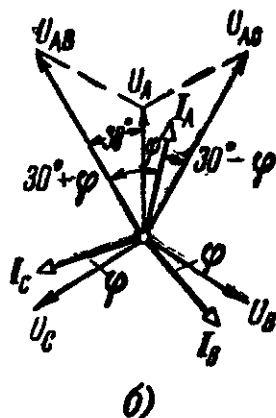
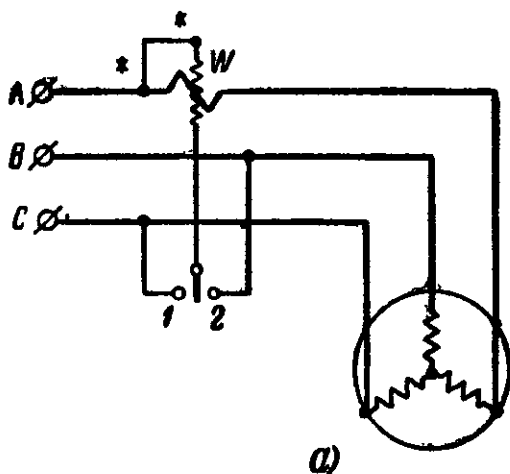


Рис 11-29. Изменение мощности в цепи трехфазного тока при равномерной нагрузке фаз однофазным ваттметром с переключением параллельной цепи ваттметра.

а — схема соединения; б — векторная диаграмма.

Сумма показаний ваттметра дает активную мощность цепи трехфазного тока:

$$\begin{aligned} P &= P'_w + P''_w = I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos(30^\circ - \varphi) + I_{\text{л}} U_{\text{л}} \cos(30^\circ + \varphi) = \\ &= I_{\text{л}} U_{\text{л}} [\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(30^\circ + \varphi)] = \end{aligned}$$

$$= I_{\pi} U_{\pi} 2 \cos \frac{(30^{\circ} + \varphi) + (30^{\circ} - \varphi)}{2} \cos \frac{(30^{\circ} + \varphi) - (30^{\circ} - \varphi)}{2} =$$

$$= I_{\pi} U_{\pi} 2 \cos 30^{\circ} \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} I_{\pi} U_{\pi} \cos \varphi.$$

11-8. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХПРОВОДНЫХ ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА МЕТОДОМ ДВУХ ВАТТМЕТРОВ

Для измерения мощностей в цепях трехфазного тока, нагрузка которых может быть как равномерной, так и неравномерной, применяются два одноэлементных ваттметра или один двухэлементный ваттметр.

Докажем, что активная мощность трехфазной цепи может быть измерена двумя ваттметрами.

Активная мощность трехфазной цепи

$$P = I_A U_A \cos \varphi_A + I_B U_B \cos \varphi_B + I_C U_C \cos \varphi_C. \quad (11-18)$$

Мгновенная мощность трехфазной цепи p может быть выражена как

$$p = p_A + p_B + p_C = i_A u_A + i_B u_B + i_C u_C, \quad (11-19)$$

где p_A , p_B , p_C — мгновенные мощности отдельных фаз.

Если, например, приемники энергии соединены звездой (рис. 11-30, а), то для нулевой точки 0 согласно первому закону Кирхгофа можно написать:

$$i_A + i_B + i_C = 0,$$

откуда

$$i_A = -i_B - i_C \quad (11-20a)$$

или

$$i_B = -i_A - i_C, \quad (11-20б)$$

или

$$i_C = -i_A - i_B. \quad (11-20в)$$

Подставляя одно из этих выражений, например (11-20в), в формулу (11-19), получаем:

$$p = i_A u_A + i_B u_B - i_A u_C - i_B u_C = i_A (u_A - u_C) + i_B (u_B - u_C). \quad (11-21)$$

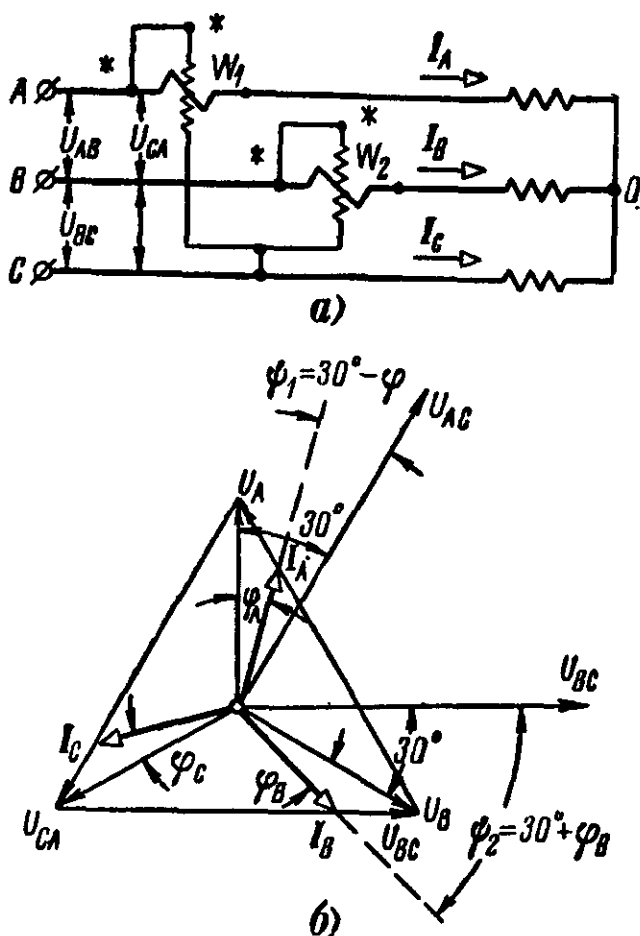


Рис. 11-30. Измерение мощности в цепи трехфазного тока.

a — схема соединения двух одиоэлементных ваттметров или одного двухэлементного; *b* — векторная диаграмма.

Но $u_A - u_C$ представляют собой мгновенную величину линейного напряжения u_{AC} , а $u_B - u_C$ — мгновенную величину линейного напряжения u_{BC} .

Таким образом, величина мгновенной мощности цепи трехфазного тока может быть представлена в виде суммы двух слагаемых

$$p = p' + p'',$$

где

$$p' = i_A u_{AC}, \text{ а } p'' = i_B u_{BC}.$$

Активная (средняя) мощность цепи трехфазного тока также может быть представлена в виде суммы двух слагаемых:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T p' \, dt + \frac{1}{T} \int_0^T p'' \, dt = P' + P''.$$

Если токи и напряжения изменяются по закону синуса, то активная мощность трехфазной цепи

$$P = P' + P'' = \frac{1}{T} \int_0^T i_A u_{AC} dt + \frac{1}{T} \int_0^T i_B u_{BC} dt = \\ = I_A U_{AC} \cos \psi_1 + I_B U_{BC} \cos \psi_2, \quad (11-22)$$

где ψ_1 — угол сдвига фаз между током I_A и напряжением U_{AC} ;

ψ_2 — угол сдвига фаз между током I_B и напряжением U_{BC} .

Первое слагаемое выражения (11-22) измеряется одним ваттметром, второе слагаемое — вторым. Для этого ваттметры необходимо соединить следующим образом. Последовательная цепь первого ваттметра в соответствии с индексом A у тока I_A включена в рассечку провода A , и так как ток положителен, то генераторный зажим этой цепи соединен с источником питания, а негенераторный зажим — с потребителем (рис. 11-30). Генераторный зажим параллельной цепи в соответствии с первой частью индекса A у напряжения U_{AC} соединен с проводом A , а негенераторный зажим той же цепи в соответствии со второй частью индекса C присоединен к проводу C . Аналогичным образом включен второй ваттметр (рис. 11-30). Алгебраическая сумма показаний ваттметров дает активную мощность трехфазной цепи.

В частном случае при симметричной системе напряжений и одинаковой нагрузке фаз (рис. 11-30,б)

$$\psi_1 = 30^\circ - \varphi \text{ и } \psi_2 = 30^\circ + \varphi.$$

В этом случае алгебраическая сумма показаний двух ваттметров или показания двухэлементного ваттметра

$$P = IU \cos (30^\circ - \varphi) + IU \cos (30^\circ + \varphi) = \\ = IU [\cos (30^\circ - \varphi) + \cos (30^\circ + \varphi)] = \\ = IU \left[2 \cos \frac{(30^\circ + \varphi) + (30^\circ - \varphi)}{2} \cos \frac{(30^\circ + \varphi) - (30^\circ - \varphi)}{2} \right] = \\ = IU \cdot 2 \cos 30^\circ \cdot \cos \varphi = \sqrt{3} IU \cos \varphi.$$

Так как при равномерной нагрузке показания ваттметров

$$P' = IU \cos(30^\circ - \varphi) \text{ и } P'' = IU \cos(30^\circ + \varphi),$$

то они будут одинаковыми только при активной нагрузке ($\varphi = 0$), так как в этом случае

$$P = P' = IU \cos 30^\circ.$$

При нагрузке с углом сдвига 60° ($\varphi = 60^\circ$) показания одного из ваттметров будут равны нулю, так как

$$P'' = IU \cos(30^\circ + \varphi) = IU \cos(30^\circ + 60^\circ) = 0$$

и, следовательно, вся мощность трехфазной цепи измеряется одним ваттметром.

При угле сдвига $\varphi > 60^\circ$ выражение мощности, измеряемой вторым ваттметром, $P'' = IU \cos(30^\circ + \varphi)$ получает отрицательное значение, так как $(30^\circ + \varphi) > 90^\circ$, а косинусы углов, больших 90° , отрицательны. Следовательно, подвижная часть второго ваттметра будет поворачиваться в обратную сторону, а так как влево от нуля шкалы делений обычно нет, то для производства отсчета приходится изменять на 180° фазу тока в одной из цепей второго ваттметра. В этом случае для получения мощности цепи трехфазного тока нужно из показаний первого ваттметра вычесть показание второго, так как

$$P = P' + (-P'') = P' - P''.$$

При равномерной нагрузке фаз алгебраическая разность показаний ваттметров, умноженная на $\sqrt{3}$, равна реактивной мощности трехфазной системы:

$$\begin{aligned} \sqrt{3}(P' - P'') &= \sqrt{3}[UI \cos(30^\circ - \varphi) - UI \cos(30^\circ + \varphi)] = \\ &= \sqrt{3}UI (\cos 30^\circ \cdot \cos \varphi + \sin 30^\circ \cdot \sin \varphi - \cos 30^\circ \cdot \cos \varphi + \\ &+ \sin 30^\circ \cdot \sin \varphi) = \sqrt{3}UI 2 \sin 30^\circ \cdot \sin \varphi = \sqrt{3}UI \sin \varphi = Q, \end{aligned}$$

в то время как алгебраическая сумма показаний двух ваттметров равна активной мощности трехфазной системы, т. е.

$$P' + P'' = \sqrt{3}UI \cos \varphi = P.$$

Таким образом, при равномерной нагрузке фаз трехфазной системы из показаний ваттметров P' и P'' мож-

но определить тангенс угла сдвига между фазным током и фазным напряжением:

$$\frac{\sqrt{3}(P' - P'')}{P' + P''} = \frac{\sqrt{3}UI \sin \varphi}{\sqrt{3}UI \cos \varphi} = \operatorname{tg} \varphi.$$

Можно доказать, что активную мощность трехфазной цепи можно измерить двумя ваттметрами и в том случае, когда приемники энергии соединены в треугольник.

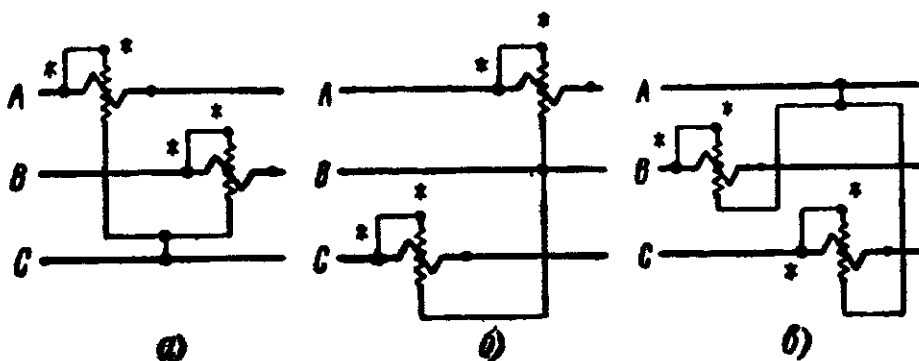


Рис. 11-31. Три схемы включения двухэлементного ваттметра.

При этом показания ваттметров определяются теми же уравнениями (11-22), что и при соединении приемников энергии в звезду.

На рис. 11-31 даны три возможные схемы включения ваттметров. Правильность их можно доказать аналогичным путем, подставляя в формулу (11-19) значения для токов из равенства (11-20а) или (11-20б).

Так как пользование двумя ваттметрами неудобно, то часто применяют двухэлементные ваттметры.

Как показывает само название, двухэлементный ваттметр состоит из двух элементов, каждый из которых ничем не отличается от такового в однофазном ваттметре.

В электродинамическом и ферродинамическом ваттметрах каждый элемент состоит из неподвижной катушки тока и подвижной катушки напряжения. В одних конструкциях две подвижные катушки крепятся на одной оси с указательной стрелкой (рис. 4-19), в других — каждая катушка крепится на своей оси. В последнем случае оси связываются механической передачей, при помощи которой производится суммирование вращающих моментов на той из осей, на которой крепится указательная стрелка.

Отечественная промышленность выпускает двухэлементные ваттметры как электродинамической, так и ферродинамической системы, например: 1) электродинамический переносный двухэлементный ваттметр типа Д-521, класса точности 0,5, номинальный ток 5 а, номинальное напряжение 150 в; 2) ферродинамический щитовой двухэлементный ваттметр типа Д-341, класса точности 2,5, номинальный ток 5 а, номинальное напряжение 127—220—380 в.

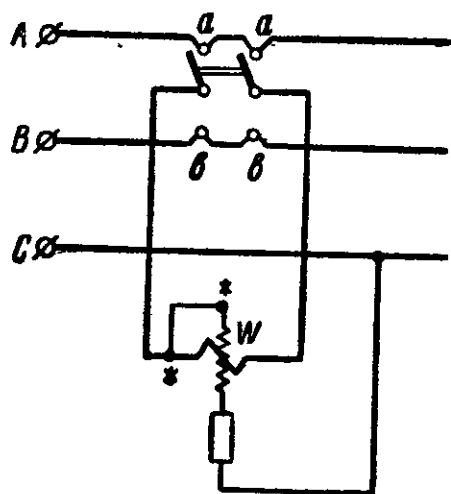


Рис. 11-32. Схема для измерения мощности методом двух ваттметров с применением одного ваттметра с переключателем.

Выпускавшиеся ранее индукционные ваттметры сняты с производства.

При лабораторных и промышленных испытаниях цепей трехфазного тока (двигателей) иногда применяется измерение мощности методом двух ваттметров с применением только одного ваттметра (например, типа АСТ-Д). В этом случае последовательная обмотка ваттметра при помощи специального переключателя включается поочередно в рассечку то одного (А), то другого (В) провода трехфазной цепи.

Устройство переключателя таково, что при поднятых ножах (рис. 11-32) неподвижные зажимы *aa* переключателя замкнуты накоротко; также накоротко замкнуты и зажимы *bb*. Ставя ножи переключателя на зажимы *aa*, мы присоединяем последовательную обмотку ваттметра к этим зажимам. При дальнейшем движении ножей в зажимах *aa* происходит отсоединение пластины, замыкавшей накоротко эти зажимы, и последовательная обмотка ваттметра оказывается включенной в рассечку провода А. После отсчета по ваттметру мощности P' при обратном движении ножей происходит замыкание накоротко зажимов *aa*, а затем и отсоединение ножей и последовательной обмотки ваттметра от этих зажимов. Аналогичным образом происходит включение последовательной обмотки ваттметра в провод В и измерение мощности P'' . Алгебраическая сумма двух показаний ваттметра дает мощность трехфазной цепи (11-22).

11-9. ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

а) Измерение реактивной мощности в четырехпроводных цепях трехфазного тока

В четырехпроводных цепях трехфазного тока реактивную мощность можно измерять тремя однофазными (одноэлементными) ваттметрами активной мощности или одним трехэлементным ваттметром активной мощности.

Возможность измерения реактивной мощности цепи трехфазного тока ваттметрами активной мощности вытекает из следующих соображений.

Мощность, показываемая однофазным ваттметром активной мощности, определяется током I его последовательной катушки, напряжением U , приложенным к его параллельной цепи, и косинусом угла сдвига между током I и напряжением U . Если такой ваттметр включить так, чтобы между током I его последовательной катушки и напряжением U' на его параллельной цепи был угол сдвига $90^\circ - \varphi$ (рис. 11-33), то ваттметр будет измерять реактивную мощность:

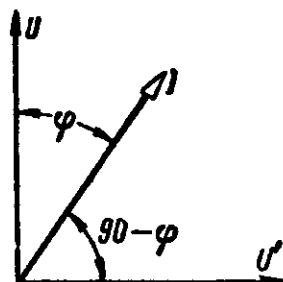


Рис. 11-33. Векторная диаграмма ваттметра активной мощности, включенного для измерения реактивной мощности.

$$Q = IU' \cos(90^\circ - \varphi) = U'I \sin \varphi.$$

В цепях трехфазного тока при симметричной системе напряжений (рис. 11-34) линейное напряжение U_{BC} отстает по фазе от фазного напряжения U_A на угол 90° ; точно так же отстает по фазе U_{CA} относительно U_B и U_{AB} относительно U_C . Таким образом, включив последовательную обмотку первого ваттметра активной мощности на ток I_A , а параллельную цепь его подключив к линейному напряжению U_{BC} , получим показание ваттметра

$$I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} I_A U_A \sin \varphi = \sqrt{3} Q_A,$$

т. е. ваттметр будет измерять мощность, в $\sqrt{3}$ раз большую реактивной мощности фазы А. Таким образом, деля показания ваттметра на $\sqrt{3}$ или производя соответствующую

щую переградуировку ваттметра, можно по его показаниям определять реактивную мощность фазы А.

Аналогично второй и третий ваттметры (рис. 11-34) будут измерять реактивные мощности фаз В и С с пре-

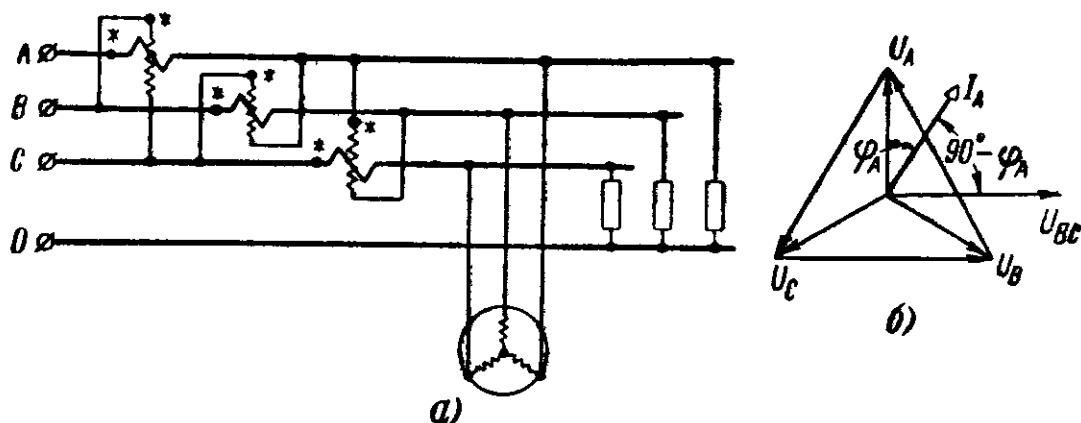


Рис. 11-34. Включение ваттметров активной мощности для измерения реактивной мощности в четырехпроводной цепи трехфазного тока.

а — схема; б — векторная диаграмма.

увеличением в $\sqrt{3}$ раз. Следовательно, сумма показаний трех ваттметров, деленная на $\sqrt{3}$, даст реактивную мощность четырехпроводной цепи трехфазного тока.

б) Измерение реактивной мощности в трехпроводной цепи трехфазного тока

1. При неравномерной нагрузке фаз, но симметричной системе напряжений реактивную мощность цепи трехфазного тока можно измерить или трехэлементным ваттметром, или тремя одноэлементными ваттметрами активной мощности, включая их по той же схеме, что и в четырехпроводной цепи (рис. 11-35). Для получения

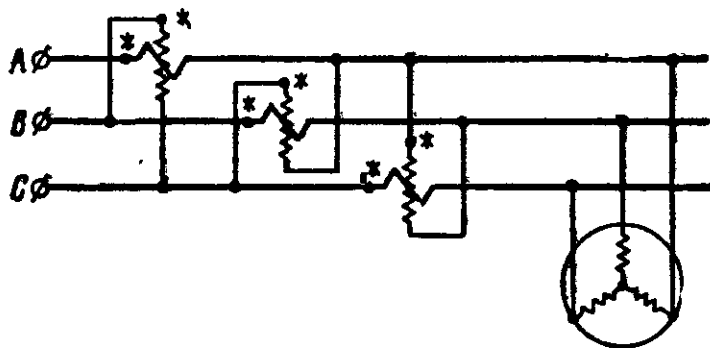


Рис. 11-35. Схема включения ваттметров активной мощности для измерения реактивной мощности в трехпроводной цепи трехфазного тока.

величины реактивной мощности цепи трехфазного тока показания ваттметра нужно делить на $\sqrt{3}$.

При равномерной нагрузке фаз и симметричной системе напряжений можно пользоваться только одним

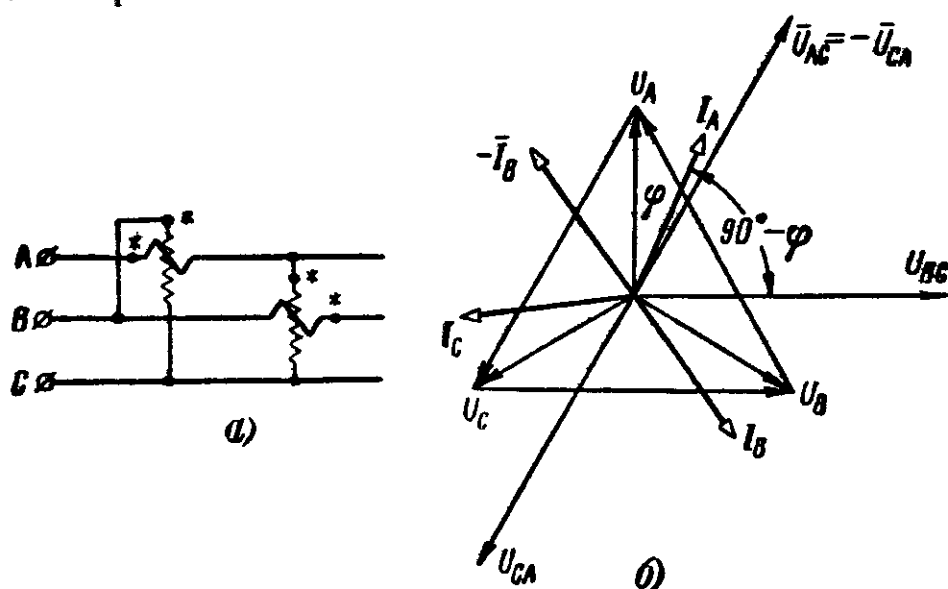


Рис. 11-36. Включение двух ваттметров для измерения реактивной мощности в цепи трехфазного тока.

а — схема; б — векторная диаграмма.

одноэлементным ваттметром активной мощности (рис. 11-35). Так как ваттметр (например, первый) дает показания

$$Q_1 = I_A U_{BC} \cos (90^\circ - \varphi) = \sqrt{3} I_\phi U_\phi \sin \varphi = \sqrt{3} Q_\phi,$$

а реактивная мощность трехфазной цепи

$$Q = 3Q_\phi,$$

то показания ваттметра нужно множить на $\sqrt{3}$.

2. Как уже упоминалось в § 11-8, при равномерной нагрузке и симметричной системе напряжений реактивную мощность можно определить по показанию двух ваттметров, включенных для измерения активной мощности (рис. 11-30), беря алгебраическую разность их показаний и умножая ее на $\sqrt{3}$.

3. При равномерной нагрузке фаз и симметричной системе напряжений реактивную мощность можно определить по показанию двух одноэлементных ваттметров или одного двухэлементного ваттметра активной мощности (рис. 11-36,а).

Как следует из векторной диаграммы (рис. 11-36,б), мощность, измеряемая двухэлементным ваттметром,

$$Q' = I_A U_{BC} \cos(90^\circ - \varphi) + I_B U_{CA} \cos(90^\circ - \varphi) = 2I_\Delta U_\Delta \sin \varphi,$$

а так как реактивная мощность трехфазной цепи

$$Q = \sqrt{3} I_\Delta U_\Delta \sin \varphi,$$

то показание ваттметра необходимо множить на $\frac{\sqrt{3}}{2} = 0,865$.

Если двухэлементный ваттметр предназначен для измерения реактивной мощности, то его можно отрегули-

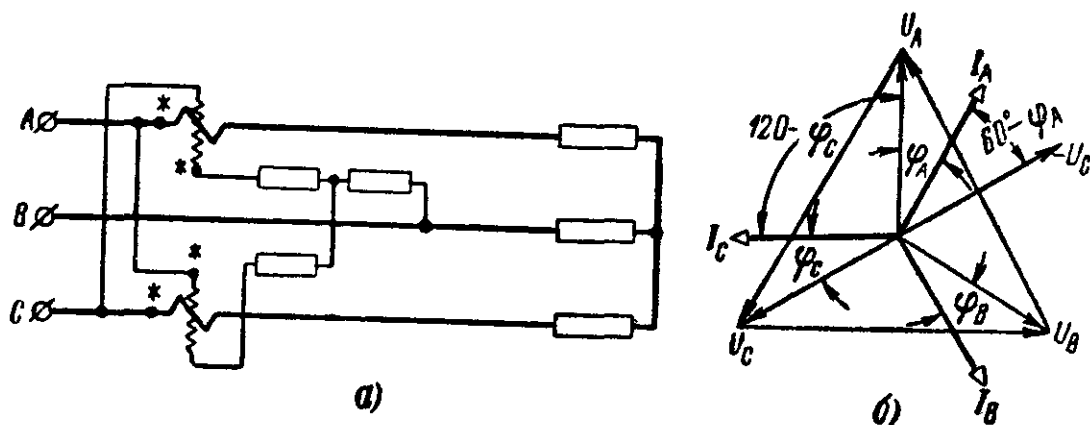


Рис. 11-37. Измерение реактивной мощности в цепи трехфазного тока двумя ваттметрами активной мощности.

а — схема; б — векторная диаграмма.

ровать так, чтобы он непосредственно указывал значение реактивной мощности.

4. При неравномерной нагрузке фаз, но симметричной системе напряжений реактивную мощность трехфазной цепи можно измерить двумя ваттметрами активной мощности (или одним двухэлементным), включая их по схеме, показанной на рис. 11-37,а. Две параллельные цепи ваттметров и добавочное сопротивление, равное сопротивлению каждой из параллельных цепей ваттметра, образуют симметричную звезду, вследствие чего на каждой из параллельных цепей ваттметров будет действовать фазное напряжение: на параллельную цепь первого ваттметра U_C и второго ваттметра U_A (рис. 11-37,б). Сумма показаний ваттметров

$$P_1 + P_2 = I_A U_C \cos(60^\circ - \varphi) + I_C U_A \cos(120^\circ - \varphi) =$$

$$= I_{\Phi} U_{\Phi} \left(\frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi - \frac{1}{2} \cos \varphi + \frac{\sqrt{3}}{2} \sin \varphi \right) = \\ = \sqrt{3} I_{\Phi} U_{\Phi} \sin \varphi = \sqrt{3} Q_{\Phi}.$$

Таким образом, для получения реактивной мощности цепи трехфазного тока нужно умножить показания ваттметра на $\sqrt{3}$.

Отечественная промышленность выпускает ферродинамические ваттметры реактивной мощности типа Д-341/1, класса точности 2,5, номинальный ток 5 а, номинальное напряжение 127—220—380 в, работающий по схеме, данной на рис. 11-37. По этой же схеме работает ферродинамический ваттметр активной и реактивной мощностей типа Д-343, класса точности 2,5 при измерении им реактивной мощности.

11-10. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Если токи трехфазной цепи низкого напряжения превышают номинальные токи измерительных приборов, то последние включаются через измерительные трансформаторы тока.

В цепи трехфазного тока высокого напряжения измерительные приборы включаются через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Если тот или иной прибор, например ваттметр, предназначен для постоянной совместной работы с каким-либо трансформатором (или трансформаторами), то обычно на шкале его наносятся величины первичной цепи. Если же измерительный прибор не предназначен для постоянной совместной работы с трансформаторами, то на его шкале наносятся величины, непосредственно действующие на его обмотки (т. е. величины вторичной цепи, если он включен через измерительные трансформаторы).

В этом случае при включении такого измерительного прибора через трансформаторы для получения величин первичной цепи показания его необходимо множить или на коэффициент трансформации трансформатора тока, или на коэффициент трансформации трансформатора напряжения, или, наконец, на произведение коэффициен-

тов трансформации, если данный прибор включен и через трансформатор тока и через трансформатор напряжения, например ваттметр.

При включении ваттметров и счетчиков в цепь трехфазного тока через измерительные трансформаторы чрезвычайно важно, чтобы вторичные величины (тока, напряжения), с точностью до угловой погрешности сов-

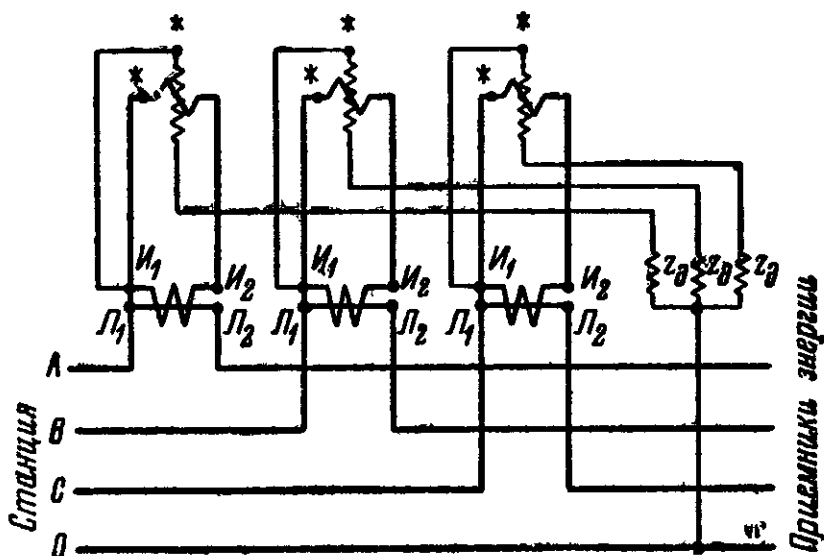


Рис. 11-38. Схема соединения трехэлементного ваттметра с трансформаторами тока.

падали по фазам с первичными величинами. В то время как перемена концов какой-нибудь обмотки однофазного ваттметра тотчас обнаруживается после его включения по направлению движения подвижной части, в двух- или трехэлементных ваттметрах перемена концов какой-либо из обмоток не обязательно вызывает изменение направления движения подвижной части, а может вызвать только или увеличение, или уменьшение вращающего момента, а следовательно, и угла поворота подвижной части прибора; следовательно, обнаружить эту неправильность будет не так легко, а между тем неправильное показание приборов может иметь чрезвычайно серьезные последствия.

Поэтому перед сборкой схемы следует всегда, с одной стороны, совершенно четко знать правильную схему включения приборов, а с другой — проверить разметку концов обмоток как измерительных приборов, так и измерительных трансформаторов.

Рассмотрим несколько схем включения приборов в цепь трехфазного тока через измерительные трансформаторы.

1. На рис. 11-38 дана схема включения трехэлементного ваттметра через измерительные трансформаторы

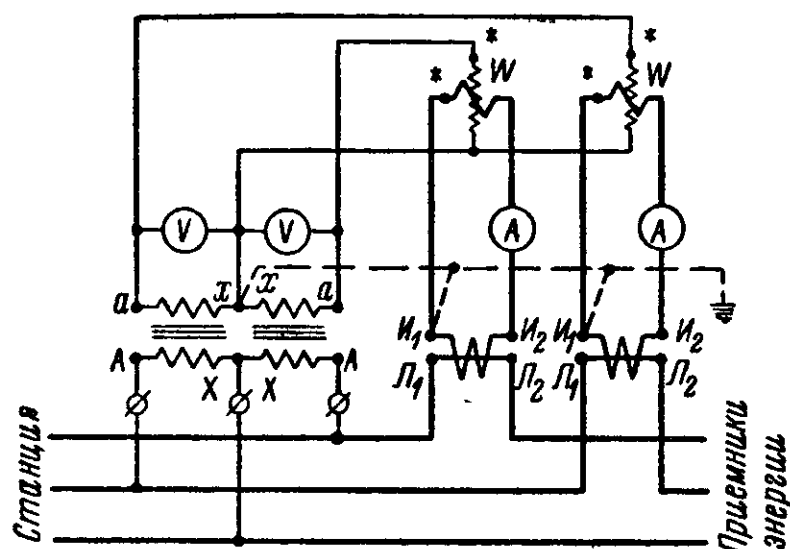


Рис. 11-39. Схема соединения двухэлементного ваттметра с измерительными трансформаторами для измерения мощности в высоковольтной цепи трехфазного тока.

тока. Если на шкале ваттметра нанесены величины мощности вторичной цепи, то первичную мощность получают из показаний ваттметра по формуле

$$P_1 = P_W k_{HI},$$

где P_1 — мощность первичной цепи;

P_W — показания ваттметра;

k_{HI} — номинальный коэффициент трансформации трансформаторов тока.

2. На рис. 11-39 дана схема включения амперметров, вольтметров и двухэлементного ваттметра (или двух однофазных ваттметров) через измерительные трансформаторы тока и напряжения.

Если на шкале ваттметра нанесены величины мощности вторичной цепи, то первичную мощность получают из показаний ваттметра по формуле

$$P_1 = P_W k_{HI} k_{HU}.$$

3. На рис. 11-40 дана схема включения ферродинамического ваттметра реактивной мощности типа Д-341/1 отечественного производства через трансформаторы тока и напряжения. На шкале ваттметра непосредственно наносятся значения мощности первичной цепи.

Пример 11-1. Двухэлементный ваттметр с номинальным напряжением $U = 120$ в, номинальным током $I = 5$ а включен по

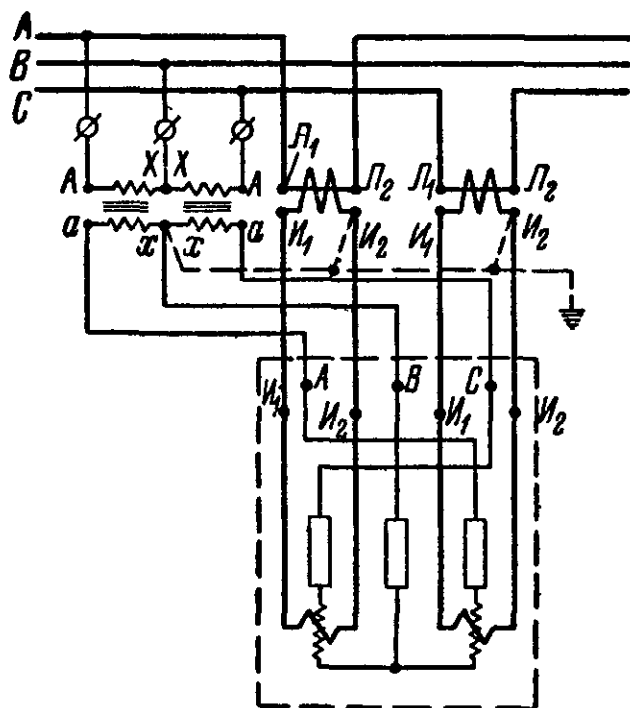


Рис. 11-40. Схема соединения ваттметра типа Д-341/1.

схеме на рис. 11-39. Коэффициент трансформации трансформаторов тока $k_{HI} = \frac{100}{5} = 20$; коэффициент трансформации трансформаторов напряжения

$$k_{nU} = \frac{6\,600}{110} = 60.$$

Определить мощность первичной цепи, если ваттметр показывает 500 вт.

Решение. $P_1 = P_W k_{HI} k_{nU} = 500 \cdot 20 \cdot 60 = 600\,000 \text{ вт} = 600 \text{ кВт}.$

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЧЕТЧИКИ

12-1. ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ

Электрические счетчики представляют собой интегрирующие приборы, предназначенные для измерения электрической энергии и количества протекающего электричества за некоторый промежуток времени.

Счетчики, так же как и показывающие приборы, делятся на системы. Наибольшее распространение получили счетчики электрической энергии индукционной системы для цепей переменного тока и электродинамической системы для цепей постоянного тока.

Для измерения количества электричества в цепях постоянного тока применяются магнитоэлектрические и электролитические счетчики.

Основное отличие счетчиков от показывающих приборов заключается в том, что угол поворота подвижной части их не ограничивается пружиной, а имеет нарастающее значение, причем каждому обороту подвижной части счетчика соответствует определенное значение измеряемой величины.

Для регистрации электрической энергии или количества электричества каждый счетчик имеет счетный механизм, представляющий собой, по существу, счетчик оборотов, соединенный с подвижной частью зубчатой передачей.

12-2. ИНДУКЦИОННЫЙ СЧЕТЧИК АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ ОДНОФАЗНОГО ТОКА

На рис. 12-1 дана схема устройства и соединения индукционного счетчика отечественного производства типа СО.

Счетчик состоит из последовательного *А* и параллельного *Б* электромагнитов, алюминиевого диска *Д*, укрепленного на оси, и постоянного тормозного магнита *М*.

При включении счетчика в цепь переменного тока по его последовательной обмотке (цепи) будет проходить

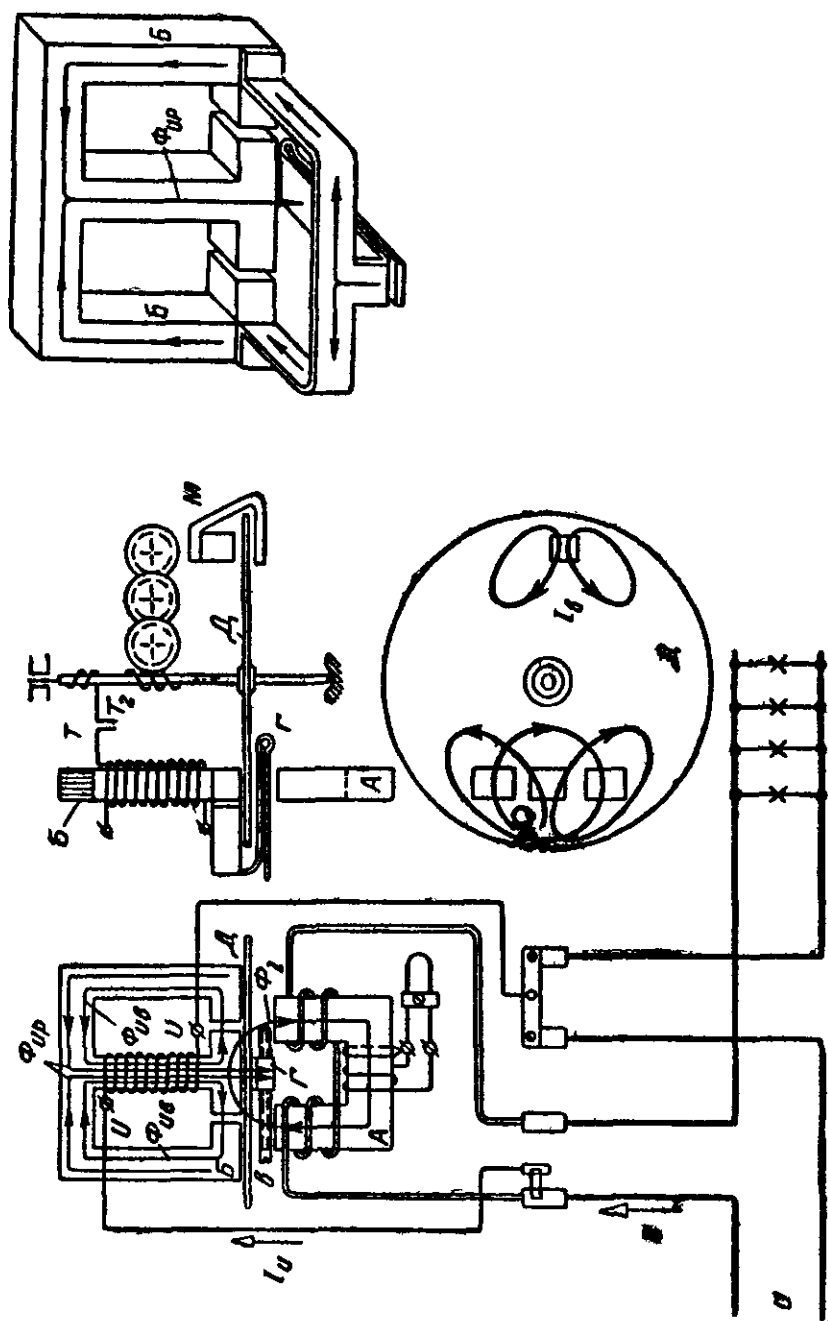


Рис. 12-1. Схема устройства и соединения индукционного счетчика.

ток потребителей энергии, вследствие чего в последовательном электромагните возникает магнитный поток Φ_I .

Напряжение U на обмотке параллельного электромагнита вызовет в ней ток I_U , и в сердечнике электромагнита будет поддерживаться магнитный поток Φ_U , состоящий из двух частей: рабочего Φ_{Up} и вспомогательного Φ_{Ub} . Магнитный поток последовательного электромагнита и рабочий поток параллельного электромагнита, пронизывая диск, индуктируют в нем вихревые токи (рис. 12-1). Вращающий момент, возникающий от взаимодействия вихревых токов с магнитными потоками [см. (4-18)], будет:

$$M = kf\Phi_{mI}\Phi_{mUp}\sin\psi, \quad (12-1)$$

где Φ_{mI} — амплитуда потока последовательного электромагнита;

Φ_{mUp} — амплитуда рабочего потока параллельного электромагнита.

Для того чтобы счетчик учитывал активную энергию, необходимо иметь вращающий момент, пропорциональный активной мощности, т. е.

$$M = k'IU\cos\varphi. \quad (12-2)$$

Из (12-1) и (12-2) следует, что для получения вращающего момента, пропорционального мощности, необходимо иметь:

1) магнитный поток последовательного электромагнита, пропорциональный току цепи;

2) рабочий магнитный поток параллельного электромагнита, пропорциональный напряжению цепи;

3) условие

$$\sin\psi = \cos\varphi.$$

Первое условие выполняется, если сердечник последовательного электромагнита находится в ненасыщенном состоянии. Второе условие выполняется, если частота переменного тока остается неизменной, так как $\Phi_U \approx$

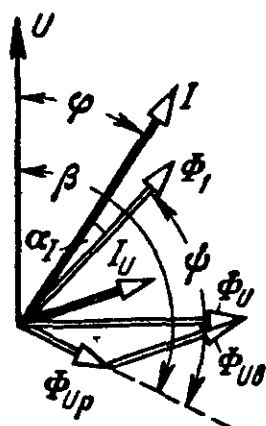
$\approx \frac{U}{4,44f\omega}$. Для выполнения третьего условия необходимо между потоками Φ_{mI} и Φ_{mUp} иметь угол

$$\psi = 90^\circ - \varphi,$$

так как в этом случае

$$\sin \psi = \sin (90^\circ - \varphi) = \cos \varphi.$$

На векторной диаграмме (рис. 12-2) даны векторы U и I , сдвинутые на угол φ . Ток I создает поток Φ_I , отстающий из-за потерь в сердечнике на угол α_I . Ток I_U



вследствие индуктивности параллельной обмотки сдвинут по фазе от напряжения на угол, близкий к 90° . Магнитные потоки Φ_{U_p} и Φ_{U_b} вследствие потерь в стали на их путях отстают от тока I_U на разные углы. Как видно из векторной диаграммы, угол между напряжением и параллельным рабочим магнитным потоком

$$\beta = \varphi + \alpha_I + \psi.$$

Рис. 12-2. Векторная диаграмма индукционного счетчика.

Подставив значение $\psi = 90^\circ - \varphi$, получим:

$$\beta = \varphi + \alpha_I + \psi = \varphi + \alpha_I + 90^\circ - \varphi = 90^\circ + \alpha_I. \quad (12-3)$$

Для получения такого угла сдвига β магнитный поток параллельного электромагнита Φ_U делится на две части — Φ_{U_p} и Φ_{U_b} (рис. 12-1). Первый замыкается через средний стержень электромагнита и противоположный Γ , нижняя часть которого расположена под диском. Второй поток Φ_{U_b} замыкается через средний и боковые стержни параллельного электромагнита, не пересекая диска. Вследствие больших потерь на пути рабочего потока Φ_{U_p} и наличия на пути этого потока диска Δ поток Φ_{U_p} сдвинут по фазе от тока I_U на больший угол, чем поток Φ_{U_b} и Φ_U (рис. 12-2). Таким образом, можно получить угол $\beta \geq 90^\circ + \alpha_I$. Подгонку угла β до значения $90^\circ + \alpha_I$ можно выполнить, воздействуя на угол β или угол α_I .

В счетчиках типа СО, СО-1, СО-2 на сердечник последовательного электромагнита накладывают короткозамкнутые витки и обмотку, замкнутую на регулируемое проволочное сопротивление (рис. 12-1). Токи, индуцируе-

мые в обмотке и короткозамкнутых витках, увеличивают потери на пути потока Φ_I и, следовательно, увеличивают α_I . Величину α_I регулируют числом витков и проводочным сопротивлением.

Таким образом, обеспечивается получение вращающего момента, пропорционального мощности (12-2).

Под влиянием вращающего момента диск счетчика придет во вращение.

При этом возникает тормозной момент, действующий на диск счетчика. Этот момент создается взаимодействием потока Φ_T тормозного магнита (рис. 12-1) с вихревыми токами I_B , индуктированными в диске при вращении его в поле того же тормозного магнита.

Тормозной момент

$$M_T = k' I_B \Phi_T.$$

Величина вихревых токов I_B при постоянном сопротивлении диска пропорциональна э. д. с. индуктированной в диске ($I_B = E_B / r_d$), а эта последняя при неизменном положении магнита пропорциональна величине потока Φ_T и скорости вращения диска, т. е. числу оборотов диска в секунду n . Следовательно,

$$M_T = k' I_B \Phi_T = k' \frac{E_B}{r_d} \Phi_T = k' \frac{k'' \Phi_T n}{r_d} \Phi_T = k''' n \Phi_T^2,$$

где $k''' = k' \frac{k''}{r_d}$ — коэффициент пропорциональности, постоянный для данного счетчика.

Если поток тормозного магнита остается неизменным, то

$$M_T = k_2 n.$$

Кроме этого основного тормозного момента, в индукционном счетчике создаются еще два тормозных момента (рис. 12-3):

1) тормозной момент M_{TUp} от взаимодействия потока Φ_{Up} с вихревыми токами, индуктированными в диске вследствие пересечения потока Φ_{Up} диском при его вращении ($M_{TUp} = k_2 \Phi_{mUp}^2 n = k_2' U^2 n$);

2) тормозной момент M_{TI} от взаимодействия потока Φ_I с вихревыми токами, индуктированными в диске вслед-

ствие пересечения потока Φ_I диском при его вращении ($M_{TI} = k_2 \Phi_{mI}^2 n = k_2'' I^2 n$).

Для того чтобы результирующий тормозной момент, равный сумме трех указанных моментов, возможно меньше зависел от потока Φ_I , его берут относительно малым по сравнению с потоком тормозного магнита. Рабочий поток параллельного электромагнита Φ_{mUp} мало

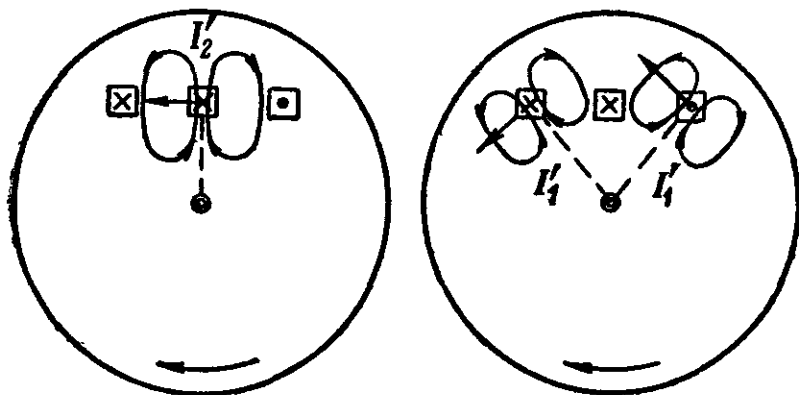


Рис. 12-3. Вихревые токи, создающие дополнительные тормозные моменты.

изменяется при нормальной работе счетчика, поэтому созданный им тормозной момент можно рассматривать как дополнительный к тормозному моменту от постоянного магнита, что и учитывается автоматически при регулировке счетчика.

При неизменной мощности цепи, в которую включен счетчик, устанавливается скорость вращения диска счетчика, при которой

$$M = M_T,$$

а следовательно,

$$k_1 P = k_2 n,$$

откуда

$$P = \frac{k_2}{k_1} n = kn.$$

Таким образом, скорость вращения диска счетчика будет пропорциональна мощности P цепи. Если в течение времени t в цепи развивается мощность P , то израсходованная энергия

$$W = Pt = knt = kN,$$

т. е. израсходованная энергия будет пропорциональна числу оборотов диска счетчика N за это время.

Следовательно, числом оборотов диска счетчика можно измерять электрическую энергию.

Коэффициент пропорциональности k для каждого счетчика является величиной приближенно постоянной и носит название действительной постоянной счетчика.

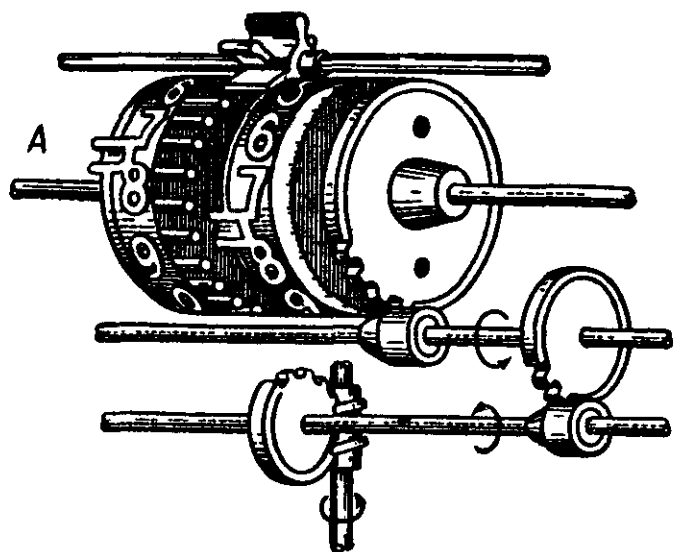


Рис. 12-4. Схема устройства счетного механизма.

Как видно из выражения, он численно равен энергии, израсходованной в сети за время одного оборота диска:

$$k = \frac{W}{N}.$$

Число оборотов диска счетчика или пропорциональная ему электрическая энергия регистрируется счетным механизмом (рис. 12-4). Движение диска счетчика через червячную передачу и шестерни передается пяти роликам, на боковых поверхностях которых нанесены цифры от 0 до 9. Ролики свободно надеты на ось A . Первый (на рис. 12-4 — правый) ролик скреплен с шестерней и при движении диска счетчика непрерывно вращается. Один оборот его вызывает поворот второго ролика на $1/10$ часть оборота. Один оборот второго ролика вызывает поворот третьего ролика также на $1/10$ часть оборота и т. д. Ролики прикрываются алюминиевым щитком с отверстиями, через которые видно только по одной цифре на каждом ролике. Таким образом, прочитанное

через отверстия в щитке числовое значение даст величину энергии, зарегистрированную счетчиком за весь период его работы, начиная с момента, когда показания его соответствовали нулевому значению.

Для нахождения энергии, израсходованной за какое-то время, нужно из показания счетчика в конце измерения вычесть показания, снятые в начале. На щитке счетчика всегда указывается передаточное число счетчика C , т. е. число оборотов диска счетчика, соответствующее единице энергии, регистрируемой счетчиком,—например, $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ равен 4 000 оборотов диска.

Величина, обратная передаточному числу, т. е. величина энергии, регистрируемая счетчиком за один оборот диска, называется номинальной постоянной счетчика k_n .

Таким образом, регистрируемая счетчиком энергия равна

$$W' = k_n N,$$

а действительная энергия, израсходованная за этот же отрезок времени,

$$W = k N.$$

Разность между величиной энергии, зарегистрированной счетчиком, и действительной величиной энергии, израсходованной в цепи, называется абсолютной погрешностью счетчика, т. е.

$$\Delta W = W' - W.$$

Относительная погрешность счетчика

$$\gamma_W = \frac{W' - W}{W} 100\%$$

или

$$\gamma_W = \frac{W' - W}{W} 100\% = \frac{k_n N - k N}{k N} 100\% = \frac{k_n - k}{k} 100\% = \gamma_k.$$

т. е. погрешность счетчика равна погрешности постоянной счетчика.

При работе счетчика имеет место трение. Момент трения вызывает погрешность, которая при малых нагрузках может быть весьма значительна. Для уменьшения этой погрешности момент трения компенсируют (при нагрузке 10% номинальной) добавочным вращающим моментом. В счетчиках типа СО для получения это-

го момента в противоположус параллельного электромагнита ввертывают стальной винт b , благодаря которому поток $\Phi_{Ур}$ делится на две части, не равные по величине и фазе. Основная часть потока $\Phi'_{Ур}$ замыкается, как и при отсутствии винта, через полюс и диск счетчика. Другая, меньшая часть потока $\Phi''_{Ур}$ ответвится через винт. Эта часть потока из-за больших потерь в винте будет отставать по фазе от потока $\Phi'_{Ур}$. Благодаря такому разделению потока $\Phi_{Ур}$ получается добавочный момент, компенсирующий трение,

$$M_d = k\Phi'_{mУр}\Phi''_{mУр} \sin(\bar{\Phi}'_{mУр}, \bar{\Phi}''_{mУр}).$$

В счетчиках типа СО-1 и СО-2 момент, компенсирующий трение, получают при помощи медного короткозамкнутого прямоугольного витка, расположенного под полюсом параллельного электромагнита (рис. 12-5).

При асимметричном расположении витка магнитное поле его, воздействуя на параллельный рабочий поток, вызывает разделение его на две не равные по величине и фазе части $\Phi'_{Ур}$ и $\Phi''_{Ур}$, вследствие чего, как и в предыдущем случае, возникает добавочный момент.

Момент, компенсирующий трение, может вызвать вращение диска счетчика при наличии напряжения и отсутствии нагрузки (холостой ход — самоход счетчика). Причиной могут послужить неправильная регулировка счетчика, повышение напряжения сети или уменьшение трения вследствие вибраций стены, на которой укреплен счетчик.

Для устранения этого явления на сердечнике параллельного электромагнита укрепляют Г-образную стальную пластину, тормозной флажок T_1 (рис. 12-1), а на оси счетчика против флажка укрепляется стальная проволока — тормозной крючок T_2 . Тормозной флажок намагничивается током параллельной катушки и при приближении тормозного крючка притягивает его с силой, достаточной для прекращения холостого хода.

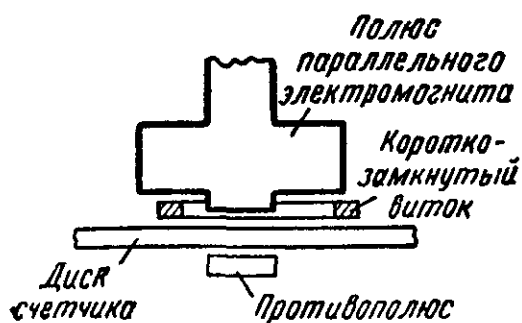


Рис 12-5 Схема устройства для создания момента, компенсирующего трение в счетчиках типа СО-1 и СО-2.

Наименьшая нагрузка, выраженная в процентах номинальной, при которой диск счетчика начинает безостановочно вращаться, называется чувствительностью счетчика.

На рис. 12-6 даны кривые погрешностей индукционных счетчиков: СО-1 — кривая 1, СО-2 — кривая 2 и СО-ОМ — кривая 3. Счетчик типа СО-ОМ, индукцион-

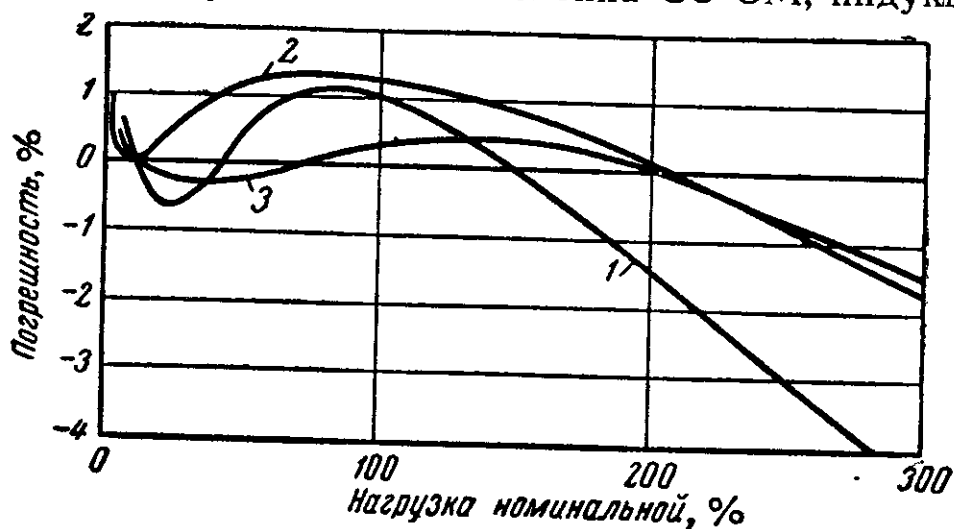


Рис. 12-6. Кривые погрешностей счетчиков 1-СО-1; 2-СО-2; 3-СО-ОМ.

ный, однофазный, малогабаритный, класса точности 2, имеет значительно меньшие погрешности по сравнению с другими.

Изгиб кривых вначале при малой нагрузке объясняется влиянием трения; при 10%-ной нагрузке производится компенсация момента трения; изгиб кривой вниз при перегрузке объясняется влиянием торможения, созданного магнитным потоком последовательного электромагнита.

На показания счетчика оказывают влияние температура, частота переменного тока и другие факторы.

Согласно ГОСТ 6570—53 по степени точности счетчики активной энергии делятся на классы 1; 2 и 2,5, а счетчики реактивной энергии — на классы 2; 2,5 и 4. Допустимые погрешности для однофазных счетчиков даны в табл. 12-1.

Счетчик должен удовлетворять следующим требованиям:

1. При прохождении тока только по параллельной цепи подвижная часть счетчика, сделав после включения не более одного оборота, должна оставаться непо-

движной при напряжениях, лежащих в границах 80—110% номинального.

2. Счетчик должен вращаться без остановки при номинальных напряжениях, частоте и $\cos \varphi = 1$ при нагрузке 0,5%, номинальной для счетчика класса 1,0; 1%, номинальной для счетчиков класса 2 и 1,5% номинальной для счетчиков классов 2,5 и 4.

Таблица 12-1

Нагрузка, % номинальной	Допустимые погрешности, %			
	Класс 1,0	Класс 2,0	Класс 2,5	
5	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	—	При $\cos \varphi = 1$
10	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	
50	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
100	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
150	$\pm 1,5$	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	
200	$\pm 2,0$	$\pm 2,0$	—	
10	$\pm 2,5$	$\pm 3,5$	—	При $\cos \varphi = 0,5$
20	$\pm 2,0$	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$	
50	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	
100	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$	$\pm 4,0$	

12-3. ИЗМЕРЕНИЕ АКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Для измерения электрической энергии в четырехпроводных цепях применяются трехэлементные счетчики. Схема включения такого счетчика (рис. 12-7) принципиально та же, что и ваттметра. Как показывает название, такой счетчик имеет три электромагнитные системы, которые воздействуют или на три диска, укрепленных на одной оси (например, счетчик типа СА4-ТЧ), или на два диска, также укрепленных на одной оси (например, счетчик типа СА4-И45, в котором на один диск воздействуют две системы, на второй — одна). Счетчик имеет один счетный механизм. Устройство каждой электромагнитной системы трехэлементного счетчика ничем не отличается от устройства электромагнитной системы однофазного счетчика.

Наиболее распространенными приборами для измерения электрической энергии в трехпроводных цепях трехфазного тока являются двухэлементные счетчики.

Двухэлементный счетчик имеет две электромагнитные системы, которые воздействуют или на один диск (например, ранее выпускавшийся счетчик типа И, рис. 12-8а), или на два диска, укрепленных на одной оси (например, счетчик типа САЗ-И43, рис. 12-8б).

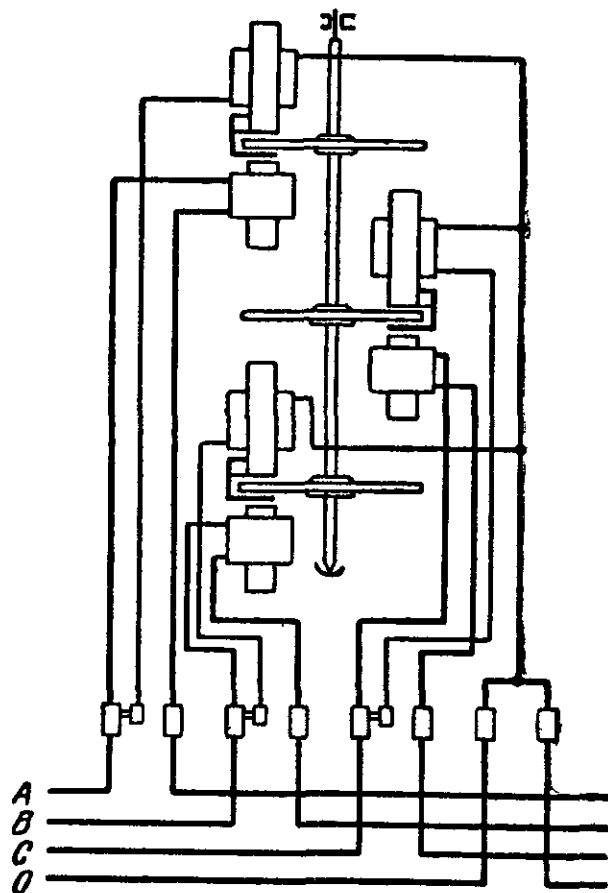


Рис 12-7. Схема устройства и соединения трехэлементного трехдискового счетчика типа СА4-ТЧ.

Иногда вместо двухэлементных счетчиков применяют два одноэлементных (однофазных) счетчика (парные счетчики), схема включения которых не отличается от схемы включения ваттметров (рис. 11-30 и 11-31).

Необходимо отметить, что погрешность двухэлементного двухдискового счетчика не зависит от неравномерности нагрузки фаз, несимметрии напряжений и последовательности фаз, так как здесь исключено влияние одного элемента счетчика на другой.

В двухэлементном однодисковом счетчике токи, наводимые в диске магнитными потоками одного элемента, проходя по диску, попадают частично в сферу действия магнитных потоков второго элемента, из-за чего будут создаваться дополнительные вращающие и тормозные моменты, обуславливающие дополнительные погрешности.

Особенно большие дополнительные погрешности могут иметь место при изменении последовательности фаз; поэтому при включении таких счетчиков необходимо следить за тем, чтобы последовательность фаз соответствовала той, при которой счетчик отрегулирован и которая указывается на схеме, прилагаемой к счетчику.

При измерении энергии парными счетчиками при угле сдвига фаз больше 60° один из счетчиков будет вращаться в обратную сторону, так как в этом случае меняется направление основного вращающего момента счетчика; из-за этого будет иметь место дополнительная

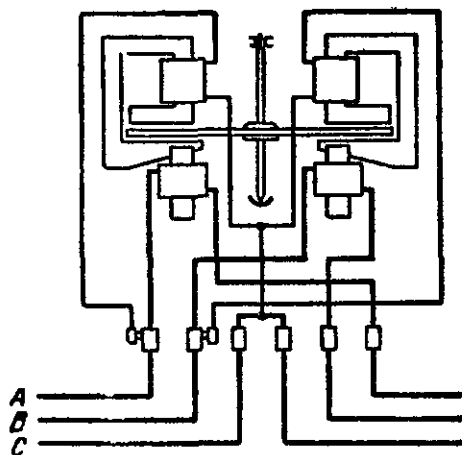


Рис 12-8а. Схема устройства и соединения двухэлементного одnodискового счетчика типа И с радиальными элементами.

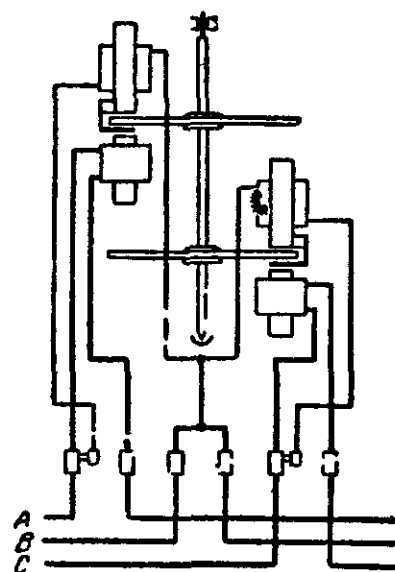


Рис 12-8б. Схема устройства и соединения двухэлементного двухдискового счетчика типа САЗ-И43.

погрешность, так как вращающий момент, компенсирующий трение, при изменении направления вращения диска сохраняет свой знак и будет в этом случае вызывать дополнительное торможение.

12-4. ИЗМЕРЕНИЕ РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ЦЕПЯХ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

а) Измерение реактивной энергии в четырехпроводных цепях трехфазного тока

В § 11-9 было показано, что реактивная мощность четырехпроводной цепи может быть измерена тремя одноэлементными ваттметрами или одним трехэлементным ваттметром активной мощности.

Так как вращающий момент счетчика, так же как и ваттметра, пропорционален мощности, то схема включения счетчика и схема включения соответствующего

ваттметра одинаковы. Из сказанного следует, что реактивную энергию четырехпроводной цепи трехфазного тока можно измерить тремя одноэлементными или одним трехэлементным счетчиком активной энергии, включая их по схеме на рис. 11-34.

Для измерения реактивной энергии в четырехпроводных цепях трехфазного тока широко применяется счетчик типа СР4-ИТР.

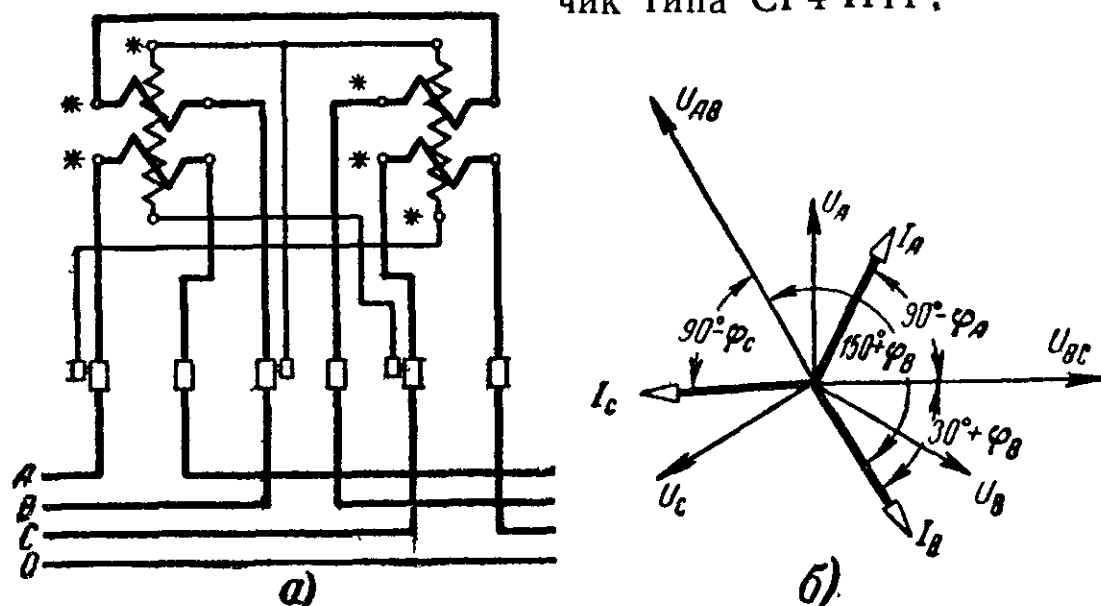


Рис. 12-9. Счетчик типа СР4-ИТР.
а — схема; б — векторная диаграмма.

Счетчик двухэлементный, каждый из последовательных электромагнитов имеет по две обмотки с одинаковым числом витков. Схема и векторная диаграмма счетчика даны на рис. 12-9.

Исходя из схемы соединения и векторной диаграммы, можно написать выражения вращающих моментов, действующих на подвижную часть счетчика.

Вращающий момент, созданный первым элементом,

$$M_1 = kU_{BC} [I_A \cos (90^\circ - \varphi_A) - I_B \cos (30^\circ + \varphi_B)] = \\ = kU_{BC} \left(I_A \sin \varphi_A - \frac{\sqrt{3}}{2} I_B \sin \varphi_B + \frac{1}{2} I_B \sin \varphi_B \right).$$

Вращающий момент, созданный вторым элементом,

$$M_2 = kU_{AB} [I_C \cos (90^\circ - \varphi_C) - I_B \cos (150^\circ + \varphi_B)] = \\ = kU_{AB} \left(I_C \sin \varphi_C + \frac{\sqrt{3}}{2} I_B \cos \varphi_B + \frac{1}{2} I_B \sin \varphi_B \right).$$

Вращающий момент, действующий на подвижную часть счетчика, при симметричной системе напряжений может быть выражен так:

$$M = M_1 + M_2 = k \sqrt{3} U_{\phi} (I_A \sin \varphi_A + I_B \sin \varphi_B + I_C \sin \varphi_C) = k \sqrt{3} Q.$$

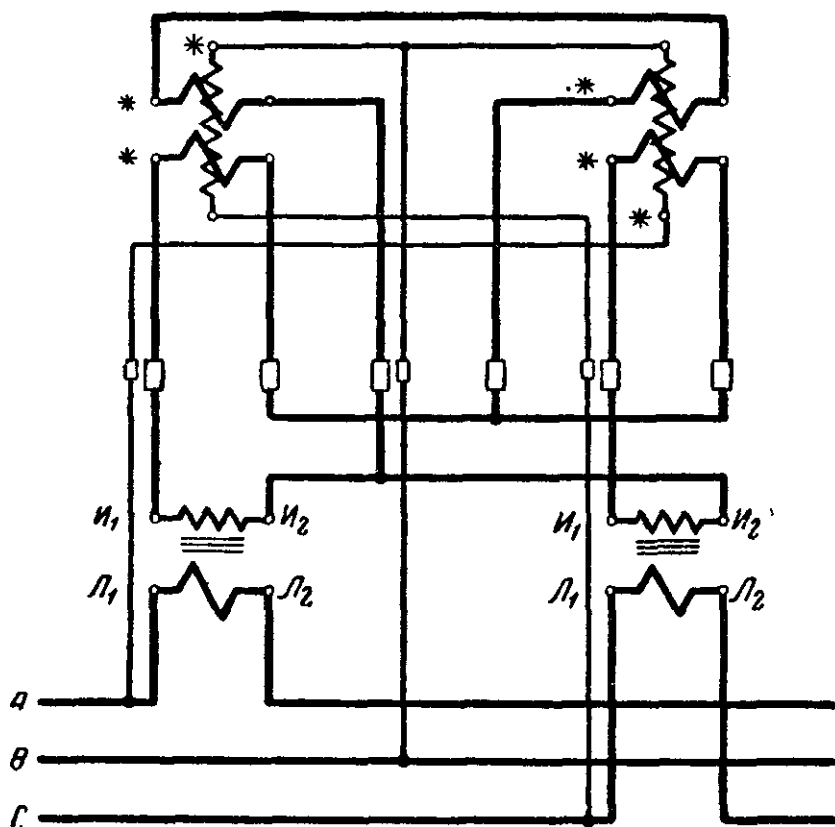


Рис. 12-10. Схема включения счетчика типа CR4-ИТР и трехпроводную цепь трехфазного тока.

Таким образом, вращающий момент счетчика пропорционален реактивной мощности, и, следовательно, счетчик может учитывать реактивную энергию.

Показания счетчика правильны при симметрии напряжений независимо от симметрии или асимметрии токов.

При включении этого счетчика необходимо считаться с порядком чередования фаз.

Эти счетчики могут применяться не только в четырехпроводных, но в трехпроводных цепях трехфазного тока.

Включение счетчиков в цепи с токами, превышающими номинальные токи счетчиков, производится через

трансформаторы тока, а включение в высоковольтные цепи — через трансформаторы тока и напряжения.

В качестве примера на рис. 12-10 дана схема включения счетчика типа СР4-ИТР с двумя трансформаторами тока в трехпроводную цепь трехфазного тока.

б) Измерение реактивной энергии в трехпроводных цепях трехфазного тока

Для измерения реактивной энергии в трехпроводных цепях трехфазного тока применяются счетчики с 60-градусным сдвигом типов СРЗ-ИТР и СРЗ-И44. Это счетчики двухэлементные, отличающиеся от счетчика активной энергии тем, что угол сдвига между напряжением на зажимах параллельной цепи каждого элемента и соответствующим параллельным рабочим магнитным потоком составляет не $90^\circ + \alpha_I$, а только $60^\circ + \alpha_I$.

Уменьшение угла сдвига достигается включением в параллельную цепь каждого элемента счетчика активного добавочного сопротивления. Схемы соединения счетчика и его векторная диаграмма даны на рис. 12-11.

Исходя из схемы соединения и векторной диаграммы (рис. 12-11), учитывая сказанное о 60-градусном сдвиге и опуская ради простоты углы потерь в стали, можно написать выражения вращающих моментов, действующих на подвижную часть счетчика.

Вращающий момент, созданный первым элементом,

$$M_1 = k_1 \Phi_{BC} \Phi_A \sin \psi_1 = k_1 \Phi_{BC} \Phi_A \sin (150^\circ - \varphi).$$

Вращающий момент, созданный вторым элементом,

$$M_2 = k_1 \Phi_{AC} \Phi_C \sin \psi_2 = k_1 \Phi_{AC} \Phi_C \sin (210^\circ - \varphi).$$

Считая

$$\Phi_A \equiv I_A; \quad \Phi_C \equiv I_C; \quad \Phi_{AC} \equiv U_{AC}; \quad \Phi_{BC} \equiv U_{BC},$$

можно написать выражение вращающего момента, действующего на подвижную часть счетчика:

$$\begin{aligned} M &= M_1 + M_2 = k U_{BC} I_A \sin (150^\circ - \varphi) + \\ &+ k U_{AC} I_C \sin (210^\circ - \varphi) = k U_{\text{л}} I_{\text{л}} [\sin (150^\circ - \varphi) + \\ &+ \sin (210^\circ - \varphi)] = k \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi. \end{aligned}$$

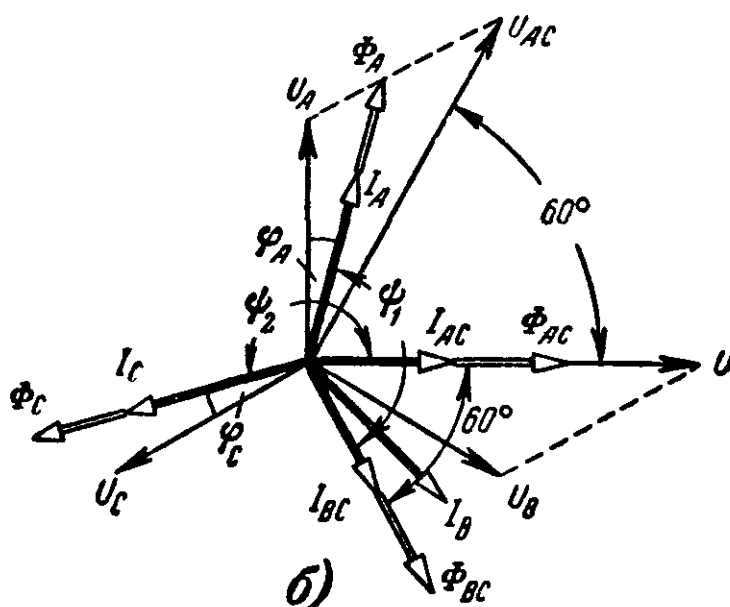
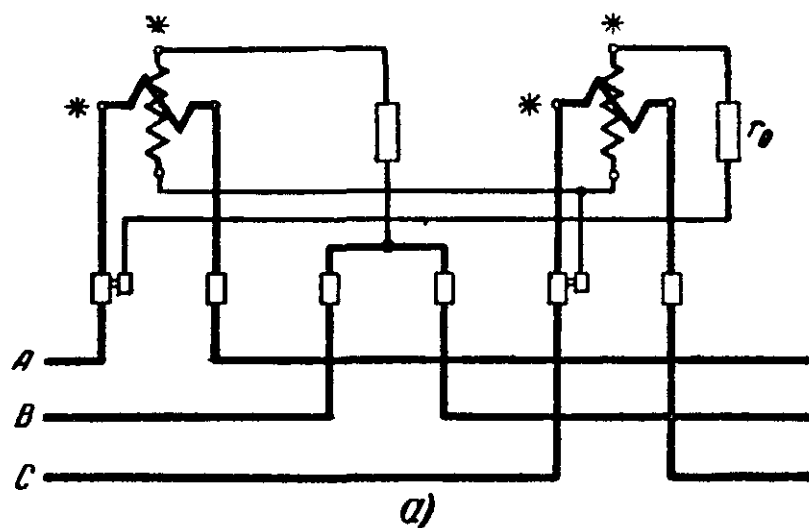


Рис. 12-11. Счетчик типа СРЗ-И44.
а — схема; б — векторная диаграмма.

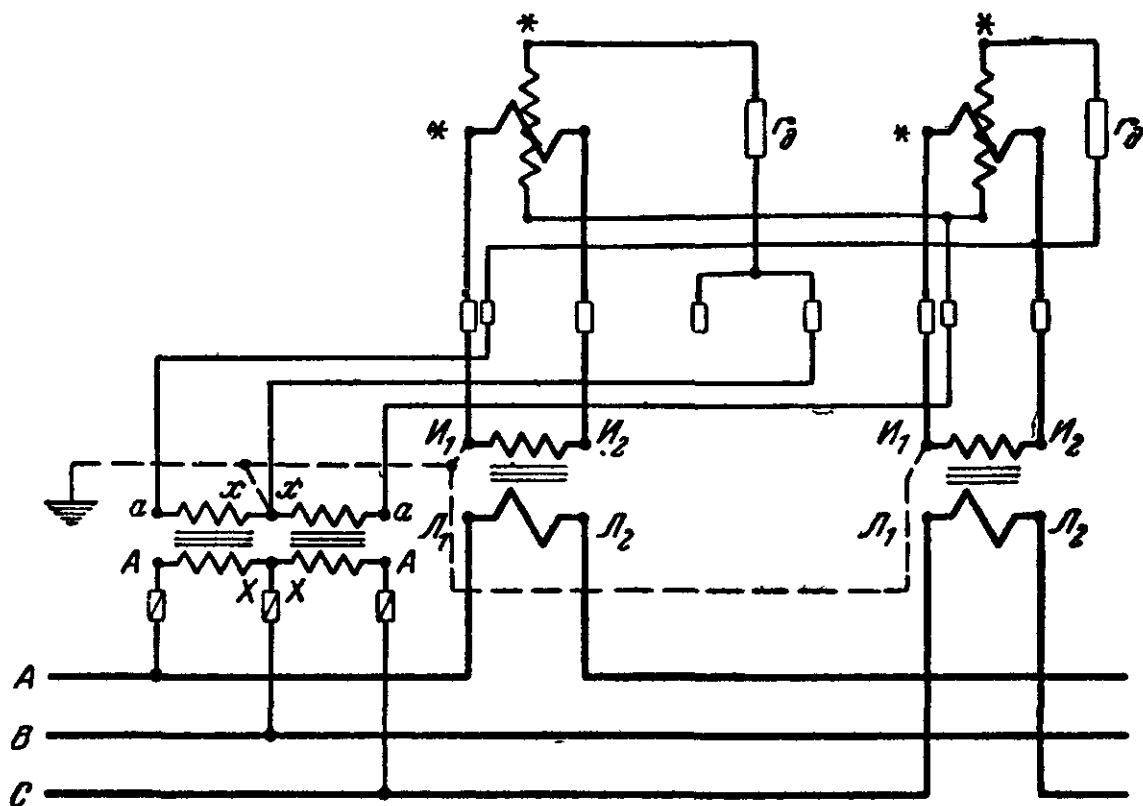


Рис. 12-12. Схема соединения счетчика типа СРЗ-И44 с трансформаторами тока и напряжения.

Из полученного выражения следует, что вращающий момент счетчика пропорционален реактивной мощности, и счетчик может учитывать реактивную энергию.

Показания счетчика правильны при симметрии напряжений независимо от симметрии или асимметрии токов.

Из сказанного в начале этого параграфа о вращающих моментах ваттметров и счетчиков и схемах их включения следует, что измерение реактивной энергии в трехпроводных цепях трехфазного тока можно производить не только счетчиками реактивной энергии, но и счетчиками активной энергии, аналогично измерениям реактивной мощности, рассмотренным в § 11-9.

На рис. 12-12 дана схема включения счетчика типа СРЗ-И44 с трансформаторами тока и напряжения.

12-5. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК

Схема устройства и включения электродинамического счетчика дана на рис. 12-13.

Счетчик состоит из неподвижной катушки тока *ББ* и подвижной части. Подвижная часть состоит из укрепленного на оси алю-

миниевого диска D и якоря $Я$. Якорь образуется тремя катушками a' , a'' и a''' , изготовленными из большого числа витков тонкой изолированной проволоки. Катушки соединяются звездой или треугольником и присоединяются к трем коллекторным пластинам. Катушки якоря, добавочное сопротивление r_d и катушка $K_{тр}$ для компенсации момента трения, соединенные последовательно, образуют параллельную цепь счетчика, включаемую на напряжение сети, энергию которой счетчик измеряет.

При токе I в последовательной обмотке счетчика внутри нее создается магнитное поле, пропорциональное этому току.

Вследствие взаимодействия этого магнитного поля с током якоря, пропорциональным напряжению, создается вращающий момент, пропорциональный мощности.

Тормозной момент, как и в индукционном счетчике, пропорционален скорости вращения диска счетчика.

Таким образом, скорость вращения диска счетчика будет пропорциональна мощности цепи, а число оборотов за произвольный отрезок времени пропорционально израсходованной в цепи энергии.

Счетный механизм, как в индукционном счетчике, непосредственно показывает энергию, израсходованную в цепи.

12-6. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СЧЕТЧИК (СЧЕТЧИКИ КОЛИЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА)

Для учета количества электричества, израсходованного в цепи постоянного тока, применяются счетчики ампер-часов.

Счетчики ампер-часов бывают двух типов: магнитоэлектрические и электролитические.

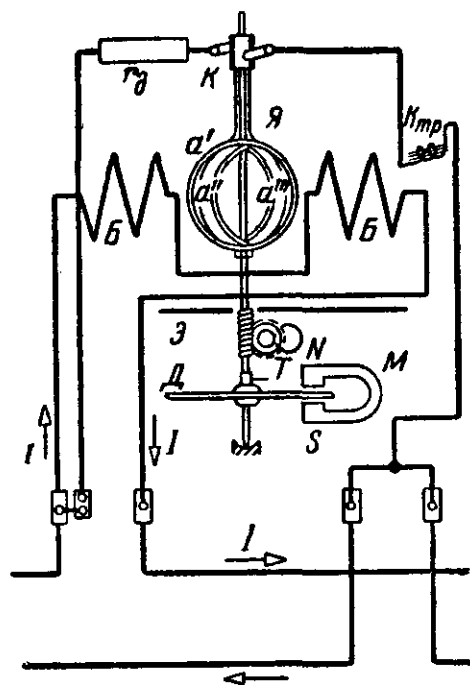
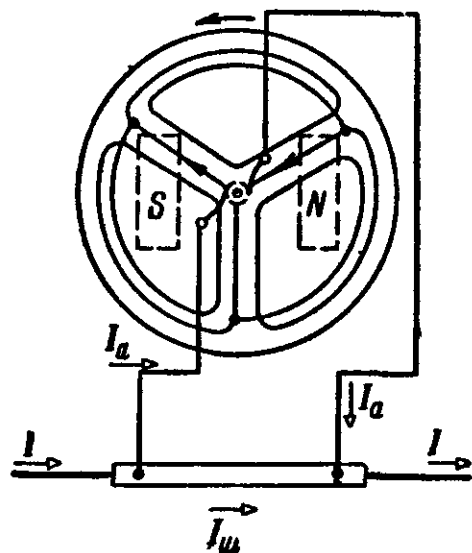


Рис. 12-13. Схема устройства электродинамического счетчика.

На рис. 12-14 дана схема устройства и включения магнитоэлектрического счетчика ампер-часов. Якорь счетчика состоит из трех плоских катушек, концы которых присоединены к трем пластинам коллектора.

Катушки якоря расположены между двумя алюминиевыми дисками. Якорь охватывается двумя постоянными магнитами. От взаимодействия тока якоря с магнитным полем

Рис. 12-14. Схема устройства счетчика ампер-часов.

постоянных магнитов создается вращающий момент, вызывающий вращение счетчика со скоростью, пропорциональной току якоря I_a и току I неразветвленной цепи.

При этом число оборотов, сделанное якорем счетчика за какой-нибудь промежуток времени, пропорционально количеству электричества, протекающему по цепи за тот же отрезок времени; следовательно, по числу оборотов счетчика можно судить о количестве электричества, прошедшего через счетчик.

Счетный механизм непосредственно показывает прошедшее через счетчик количество электричества.

Глава тринадцатая

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

13-1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ФАЗОМЕТРЫ

Коэффициент мощности цепи переменного тока можно определить косвенным методом, измеряя ток, напряжение и мощность цепи, так как

$$\cos \varphi = \frac{P}{IU}. \quad (13-1)$$

Этот метод характеризуется низкой точностью измерения, большой затратой времени на вычисления и другими недостатками. Поэтому для измерения коэффициента мощности применяют специальные приборы — фазометры.

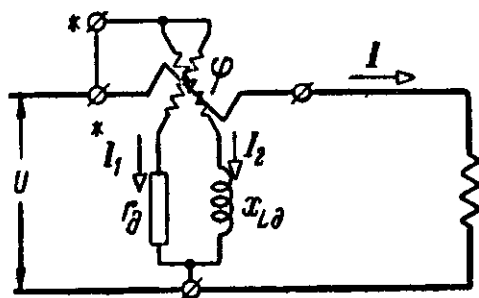


Рис. 13-1. Схема электродинамического фазометра.

Электродинамический фазометр представляет собой логометр той же системы (см. § 4-3, рис. 4-14). Неподвижная катушка его включается последовательно

с приемниками энергии (рис. 13-1). Последовательно с одной из подвижных катушек включается безреактивное добавочное сопротивление r_d , последовательно с другой — реактивная катушка с сопротивлением x_{Ld} . Подвижные катушки вместе с добавочными сопротивлениями образуют две параллельные ветви, включенные

на напряжение цепи. В одной из этих катушек ток I_1 совпадает по фазе с напряжением U , а в другой — ток I_2 отстает от напряжения на 90° (рис. 13-2).

Как известно, угол поворота подвижной части логометра [см. уравнение (4-16)]

$$\alpha = F \left(\frac{I_2 \cos \phi_2}{I_1 \cos \phi_1} \right) = F \left[\frac{I_2 \cos (90^\circ - \varphi)}{I_1 \cos \varphi} \right] = F \left(\frac{I_2}{I_1} \operatorname{tg} \varphi \right),$$

где φ — угол сдвига тока I относительно напряжения цепи.

При постоянных сопротивлениях параллельных ветвей прибора

$$\alpha = F(k \operatorname{tg} \varphi) = F_1(\varphi). \quad (13-2)$$

Таким образом, угол поворота подвижной части фазометра зависит от угла сдвига фаз между током и напряжением цепи, и, следовательно, на шкале фазометра могут быть нанесены значения угла φ или значения $\cos \varphi$.

В отличие от других электродинамических приборов показания электродинамического фазометра зависят от частоты, так как с изменением частоты будет изменяться сопротивление цепи второй параллельной катушки, в то время как сопротивление цепи первой параллельной катушки останется неизменным.

Для уменьшения этого влияния применяют различные способы. В частности, в фазометрах завода «Точэлектроприбор» типа ЭЛФ-1 и ЭЛФ-2, первый из которых изготавливается на номинальную частоту 500 гц, а второй — на 1 000 гц, применяют следующий способ.

Вторая подвижная катушка фазометра состоит из двух одинаковых половин (рис. 13-3). Последовательно с первой из них соединяется добавочная реактивная катушка с сопротивлением ωL_d , последовательно со второй половиной — добавочный конденсатор, сопротивление которого при номинальной частоте $\frac{1}{\omega_n C_d} = \omega_n L_d$. Ток в первой по-

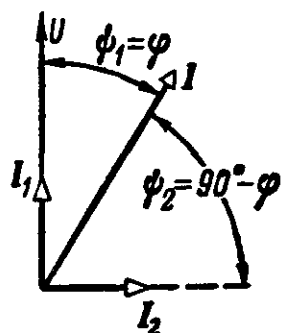


Рис. 13-2. Векторная диаграмма электродинамического фазометра.

ловине катушки отстает от напряжения примерно на $1/4$ периода, ток во второй половине опережает напряже-

ние также на $1/4$ периода. Вследствие того, что две половины катушки соединены встречно, а токи в них, равные по величине, сдвинуты по фазе на половину периода, при взаимодействии с током неподвижной катушки они создают одинаковые по величине и знаку моменты вращения.

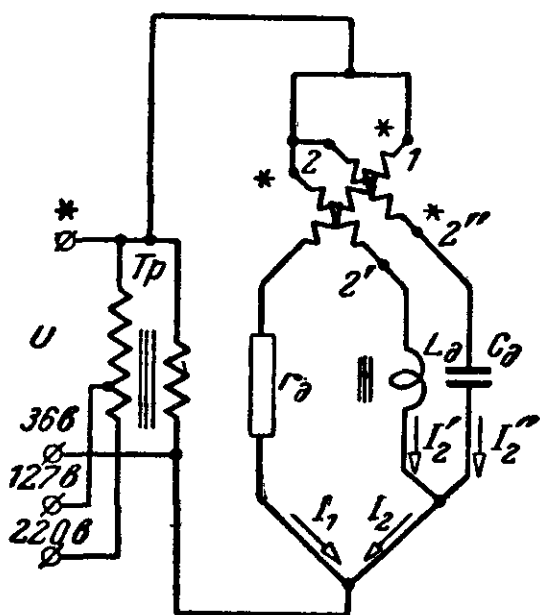


Рис. 13-3. Параллельная цепь фазометров типа ЭЛФ₁ и ЭЛФ₂.

При изменении частоты, например при ее увеличении, уменьшение тока в первой половине катушки, вызванное увеличением сопротивления (ωL_d) этой ветви, компенсируется увеличением тока во второй половине катушки, вызванным уменьшением сопротивления ($\frac{1}{\omega C_d}$) этой ветви.

Таким образом, изменение частоты в некоторых границах не вызывает погрешности в показаниях фазометра.

Рассмотренные фазометры ЭЛФ — переносные, класса точности 1, 5, с номинальным током 1 а, номинальным напряжением 36—127—220 в и шкалой 0,5с—1—0,5_L.

Электродинамический фазометр трехфазного тока отличается от рассмотренного только тем, что добавочное реактивное сопротивление в цепи второй параллельной катушки заменено активным добавочным сопротивлением, равным сопротивлению первой параллельной цепи. Последовательная катушка фазометра включается на линейный ток, а параллельные цепи — под соответствующие линейные напряжения (рис. 13-4).

Таким образом, здесь вместо 90-градусного сдвига, как

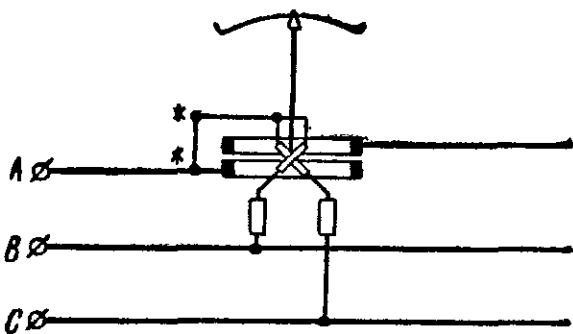


Рис. 13-4. Схема включения электродинамического фазометра в цепь трехфазного тока.

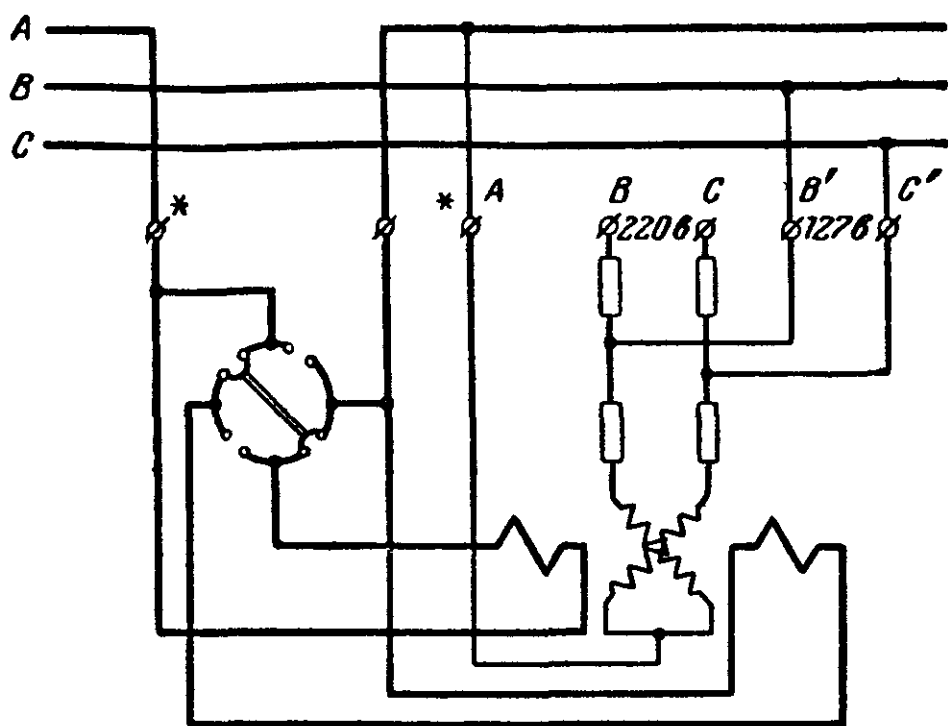


Рис. 13-5. Схема соединения трехфазного фазометра типа Д-510.

в однофазном фазометре, использован 60-градусный сдвиг между напряжениями U_{AB} и U_{AC} .

Этот фазометр можно применять только в цепях трехфазного тока при симметричной системе напряжений и токов. Показания его не зависят от частоты.

На рис. 13-5 дана схема соединения трехфазного электродинамического фазометра типа Д-510. Фазометр изготавливается на два номинальных тока и два номинальных напряжения, класс точности его 1,0.

Наряду с электродинамическими фазометрами изготавливаются также фазометры ферродинамические.

На рис. 13-6 дана схема соединения трехфазного ферродинамического щитового фазометра типа Д-342. Схема отличается от ранее рассмотренной (рис. 13-4) только двумя добавочными сопротивлениями r_B и r_C . Эти сопротивления умень-

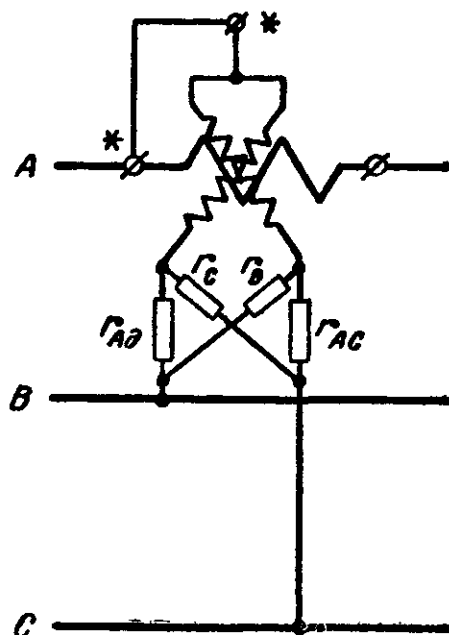


Рис. 13-6. Схема соединения ферродинамического фазометра типа Д-342.

шают угол сдвига между напряжениями на параллельных катушках фазометра, чем достигается возможность расширения пределов измерения угла φ или соответствующее ему уменьшение $\cos \varphi$.

Класс точности фазометра 2,5, номинальный ток его 5 а, номинальные напряжения: 100; 127; 220 и 380 в, шкала 0,5_с—1—0,5_л.

13-2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФАЗОМЕТР

Электромагнитный фазометр трехфазного тока типа ЭНФ имеет две неподвижные катушки тока A и C (рис. 13-7) и одну неподвижную катушку напряжения B , соединенную последовательно

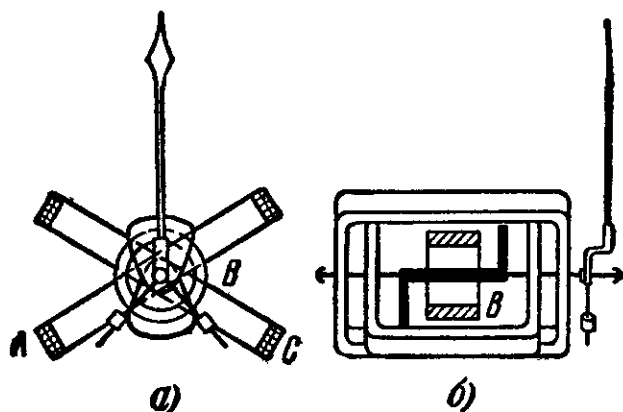


Рис. 13-7. Устройство электромагнитного фазометра.

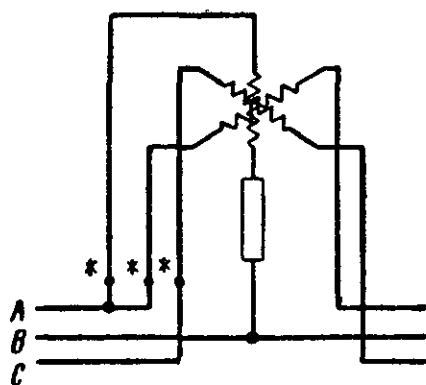


Рис. 13-8. Схема включения электромагнитного фазометра.

с добавочным сопротивлением. На одной оси со стрелкой укреплен Z-образный стальной сердечник, состоящий из двух секторообразных лепестков, соединенных трубкой. Пружины, создающие противодействующий момент, отсутствуют.

Схема включения фазометра дана на рис 13-18.

Ток катушки напряжения создает пульсирующее магнитное поле, линии которого замыкаются через лепестки стального сердечника. Магнитная индукция в точках пересечения оси катушки напряжения с плоскостью лепестков сердечника изменяется по закону синуса:

$$B_U = B_m U \sin \omega t, \quad (13-3)$$

Катушки тока, расположенные под углом 120° , при наличии в них токов I_A и I_C создают вращающееся магнитное поле. Вектор магнитной индукции в точках, расположенных на оси катушек, в течение периода изменяет свое положение в пространстве на угол 2π , т. е. вращается с угловой скоростью $\omega = 2\pi/T$.

Под влиянием вращающегося магнитного поля подвижный сердечник занимает положение, при котором магнитная энергия поля измерительного механизма будет иметь наибольшее значение. Этому условию соответствует положение сердечника, при котором его лепестки (вектор индукции пульсирующего поля) располагаются в на-

правления вектора индукции вращающегося поля, которое он занимает в момент прохождения индукции пульсирующего поля через амплитудное значение.

Так как разным углам сдвига тока нагрузки относительно напряжения сети соответствуют разные пространственные положения оси вращающегося поля в момент прохождения индукции пульсирующего поля через ее амплитудное значение, то соответственно разные положения будет занимать сердечник, т. е. подвижная часть фазометра.

Следовательно, по углу поворота подвижной части можно определять угол сдвига между фазными токами и фазными напряжениями цепи трехфазного тока.

13-3. ФАЗОУКАЗАТЕЛИ

Для определения последовательности фаз трехфазной системы или для определения опережающей и отстающей фаз применяются приборы, носящие название фазоуказателей. Фазоуказатели бывают двух типов:

1. Фазоуказатель первого типа (ФУ-2) состоит из трех маленьких катушек, соединенных в звезду, над сердечниками которых расположен легкий алюминиевый диск, могущий вращаться. На диске нарисованы черные и белые секторы, позволяющие определять направление вращения диска.

Соединяя три зажима прибора с тремя проводами сети (рис. 13-9), получаем вращение диска, так как три катушки создадут вращающееся магнитное поле, которое, пересекая диск, будет увлекать его в сторону вращения поля. Если диск вращается по часовой стрелке, то последовательность присоединенных фаз соответствует последовательности расположения зажимов на фазоуказателе (слева направо). При вращении диска против часовой стрелки последовательность фаз будет обратной, т. е. справа налево.

2. Фазоуказатель второго типа состоит из двух ламп накаливания и катушки индуктивности, соединенных в звезду. При включении в цепь трехфазного тока лампа, соединенная с фазой, опережающей фазу с индуктивностью, горит с большим накалом. При нашей схеме включения (рис. 13-9) напряжение U_C опережает U_A или напряжение U_B отстает по фазе от напряжения U_A .

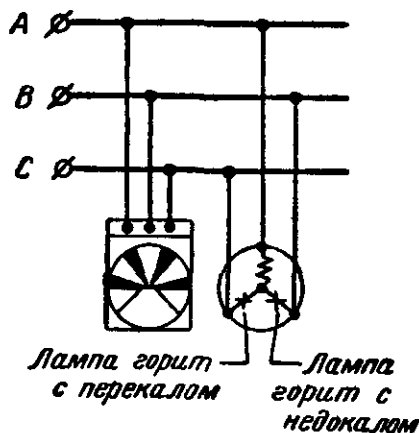


Рис. 13-9. Фазоуказатели.

13-4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЧАСТОТОМЕРЫ

Примером применения электродинамического измерительного механизма для измерения частоты может служить переносный частотомер типа Д-506, схема которого дана на рис. 13-10.

В приборе применен измерительный механизм электродинамического логометра (см. § 4-3).

Первая подвижная катушка B_1 и последовательно соединенный с ней конденсатор C_1 образуют первую параллельную ветвь. Вторая подвижная катушка B_2

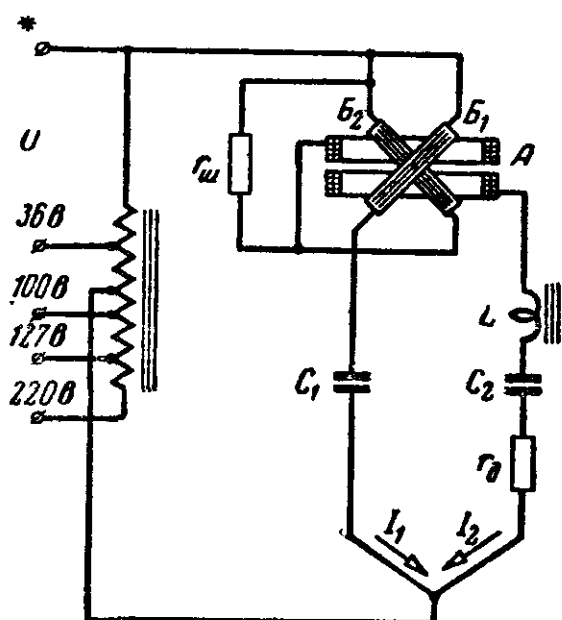


Рис 13-10. Схема частотомера типа Д-506.

и соединенные последовательно неподвижная катушка A , реактивная катушка L , конденсатор C_2 и добавочное сопротивление r_d образуют вторую параллельную ветвь прибора. Сопротивление $r_{ш}$ является подгоночным.

Индуктивность L и емкость C_2 подобраны так, чтобы при некотором среднем значении частоты, измеряемой данным прибором, было выполнено условие резонанса, т. е.

$$\omega_{ср}L = \frac{1}{\omega_{ср}C_2}.$$

В этом случае ток $I_{2рез}$ совпадает по фазе с напряжением U (рис. 13-11) и отстает от тока I_1 на 90° . Вследствие этого вращающий момент M_1 , создаваемый токами, идущими по катушкам A и B_1 , равен нулю ($M_1 = kI_1I_2 \cos 90^\circ = 0$). Под действием вращающего момента M_2 , созданного током I_2 , идущим по катушкам A и B_2 , катушка B_2 повернется и займет положение, при котором энергия магнитного поля будет наибольшей, т. е. когда оси магнитных потоков (катушек) совпадут.

При всяком изменении частоты от ее резонансного значения ток I_2 будет изменяться по величине и фазе. При этом увеличение частоты вызовет сдвиг тока I_2 от напряжения на угол одного знака, а уменьшение частоты — на угол другого знака (рис. 13-11).

Таким образом, при изменении частоты от ее резонансного значения на подвижную часть, помимо вращающего момента M_2 , будет действовать вращающий момент $M_1 \neq 0$, так как угол сдвига между током I_1

в подвижной катушке B_1 и током I_2 в неподвижной катушке A будет отличаться от 90° ($\psi_{12} \neq 90^\circ$).

Под действием вращающих моментов M_1 и M_2 подвижная часть будет поворачиваться, устанавливаясь в положение, зависящее от частоты, в котором наступает равенство двух моментов.

Частотомер включается в измеряемую цепь через автотрансформатор с номинальными первичными на-

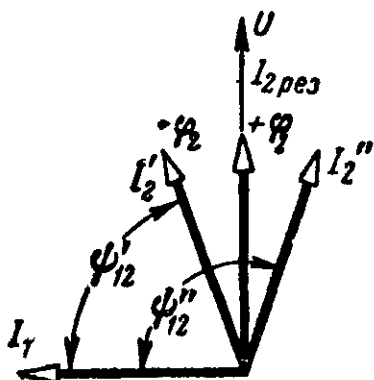


Рис. 13-11 Векторная диаграмма частотомера типа Д-506.

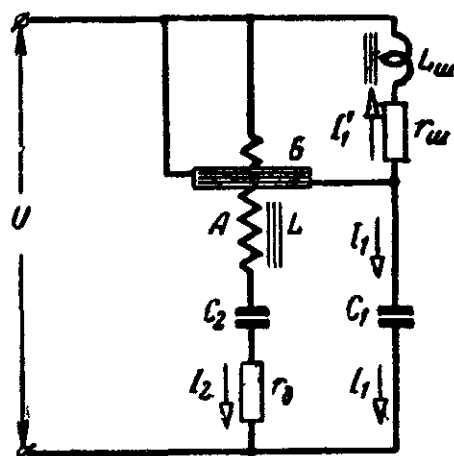


Рис. 13-12. Схема частотомера типа Д-340.

пряжениями 36—100—127 и 220 в. Класс точности его 0,2. Пределы измерения частоты прибора $\pm 10\%$ среднего значения. Приборы изготавливаются на разные средние значения частоты — от 50 до 1 500 гц.

Примером применения ферродинамического логометра для измерения частоты может служить щитовой частотомер типа Д-340, схема которого дана на рис. 13-12.

Подвижная катушка логометра B , шунтированная индуктивностью $L_{ш}$ и сопротивлением $r_{ш}$, вместе с последовательно соединенным конденсатором C_1 образуют первую параллельную ветвь прибора.

Неподвижная катушка A , имеющая индуктивность L , последовательно соединенный с ней конденсатор C_2 и добавочное сопротивление r_d , образуют вторую параллельную ветвь.

В ней, как и в рассмотренном ранее частотомере, выполнено условие резонанса $\omega_{ср}L = 1/\omega_{ср}C$, при котором ток $I_{2рез}$ совпадает по фазе с напряжением, а если пренебречь влиянием шунта, то он, кроме того, будет отставать от тока I_1 на угол $\psi_{12} \approx 90^\circ$. Таким образом, при резонансной частоте $\omega_0 = \omega_{ср}$ вращающий момент от

взаимодействия токов I_1 и I_2 , действующий на подвижную катушку B , будет равен нулю.

Теперь допустим, что катушка B расположена произвольно и магнитный поток неподвижной катушки A пронизывает витки катушки B . Естественно, в последних будет наводиться э. д. с., а так как катушка B замкнута на реактивную катушку $L_{\text{ш}}$ и сопротивление $r_{\text{ш}}$, то в этом контуре появится ток I'_1 . В результате взаимодействия этого тока I'_1 с магнитным полем катушки A возникнет дополнительный вращающий момент. Он стремится повернуть и установить катушку B так, чтобы витки ее расположились в плоскости, параллельной магнитным линиям поля неподвижной катушки, т. е. в такое нейтральное положение, в котором э. д. с. наводиться не будет. Следовательно, только в этом нейтральном положении и может находиться подвижная катушка при резонансной частоте $\omega_0 = \omega_{\text{ср}}$.

Если измеряемая частота отличается от резонансной, то взаимодействие токов I_1 и I_2 вызовет вращающий момент, который будет поворачивать подвижную катушку до тех пор, пока не уравновесится дополнительным вращающим моментом.

Направление поворота подвижной части определяется тем, больше или меньше резонансной будет измеряемая частота.

Частотомер типа Д-340 имеет класс точности 1. Номинальные напряжения его 127—220 и 380 в.

Пределы измерения частоты прибора составляют $\pm 10\%$ среднего значения частоты. Частотомер изготовляется на средние значения частоты 50 и 200 гц.

13-5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ЧАСТОТОМЕР

Электромагнитный частотомер представляет собой логометр той же системы (см. § 4-2).

Схема частотомера дана на рис. 13-13.

В одной параллельной ветви прибора соединены последовательно катушка логометра A_1 , конденсатор C_1 и реактивная катушка L_1 , которые настроены в резонанс при частоте f_1 . Другая параллельная ветвь также состоит из катушки логометра A_2 , конденсатора C_2 и реактивной катушки L_2 , которые настроены в резонанс при другой частоте — f_2 .

На рис. 13-14 даны кривые токов в катушках прибора в зависимости от частоты. Из приведенного рисунка видно, что при изменении частоты от f_1 до f_2 каждому значению частоты соответствует определенное отношение токов I_1/I_2 , следовательно, и определенный угол поворо-

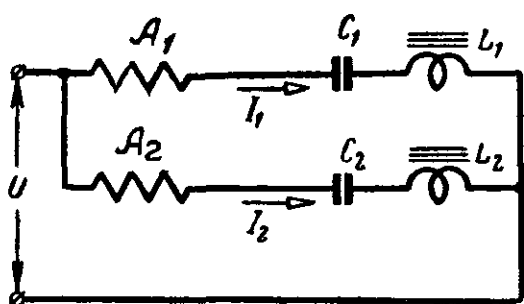


Рис. 13-13. Схема электромагнитного частотомера типа ЭЧ.

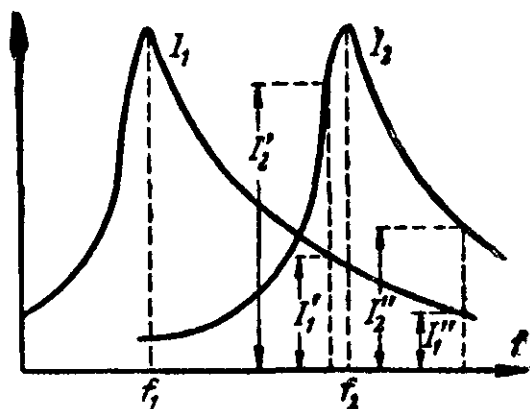


Рис. 13-14. Токи в параллельных ветвях частотомера при разной частоте.

та подвижной части прибора. Таким образом, представляется возможным на шкале прибора нанести значение частоты.

Из приведенного рисунка видно также, что некоторые отношения токов I_1/I_2 , имеющие место в границах резонансных частот $f_1 - f_2$ (в границах шкалы прибора), могут иметь место и вне этих границ, например, отношение $I'_1/I'_2 = I''_1/I''_2$. Таким образом, у этих частотомеров могут быть области ложных показаний.

Частотомеры типа ЭЧ, работающие на рассмотренном принципе, имеют класс точности 1,5 и 2,5. Они изготавливаются на разные пределы измерений, примерно от 50 до 1 500 гц. Номинальные напряжения их 36, 127 или 220 в.

13-6. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ ЧАСТОТОМЕР

Схема выпрямительного частотомера дана на рис. 13-15.

В приборе две параллельные ветви.

Первая ветвь состоит из реактивной катушки с индуктивностью L_1 , конденсатора емкостью C_1 , настроенных в резонанс при частоте 65 гц, и двухполупериодного выпрямителя.

Вторая ветвь состоит из активного сопротивления r_2 и второго двухполупериодного выпрямителя.

Выпрямленный ток первой ветви проходит через первую рамку логометра магнитоэлектрической системы, выпрямленный ток второй ветви — через вторую рамку логометра.

Угол поворота подвижной части логометра (4-6)

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right).$$

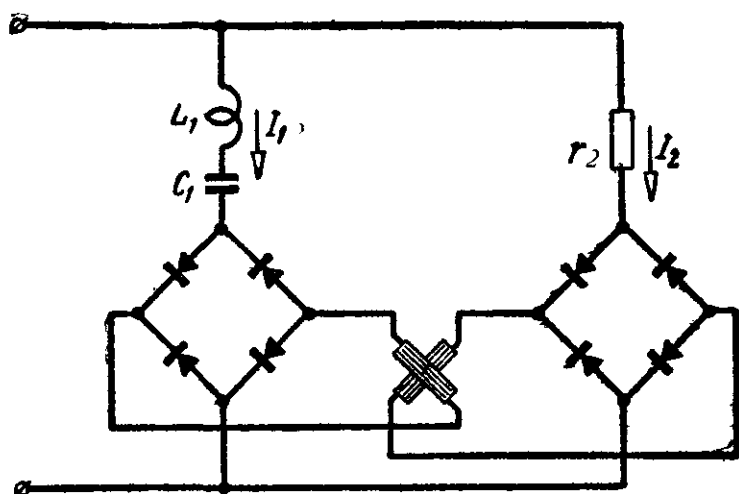


Рис. 13-15. Схема выпрямительного частотомера.

Так как отношение токов в параллельных ветвях обратно пропорционально отношению сопротивлений ветвей, то

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{r_2}{z_1}\right).$$

Сопротивление первой ветви

$$z_1 = \sqrt{r_1^2 + \left(2\pi f L_1 - \frac{1}{2\pi f C_1}\right)^2}$$

при изменении частоты от 45 до 55 гц (пределы шкалы прибора) будет уменьшаться, сопротивление второй ветви от частоты не зависит.

Следовательно, как отношение сопротивлений параллельных ветвей, так и угол поворота подвижной части прибора зависят от частоты

$$\alpha = F\left(\frac{r_2}{z_1}\right) = F_1(f).$$

Для уменьшения погрешности, обусловленной несинусоидальностью формы кривой напряжения (высшие гармоники), прибор включается через фильтр, который на рис. 13-15 не показан.

Рассмотренная схема применяется, в частности, в регистрирующих частотомерах типа Н-388.

13-7. ВИБРАЦИОННЫЙ ЧАСТОТОМЕР

На рис. 13-16 дана схема устройства вибрационного частотомера.

Под электромагнитом Э расположен якорь Я, укрепленный на горизонтальной планке А, которая закреплена на упругих пластин-

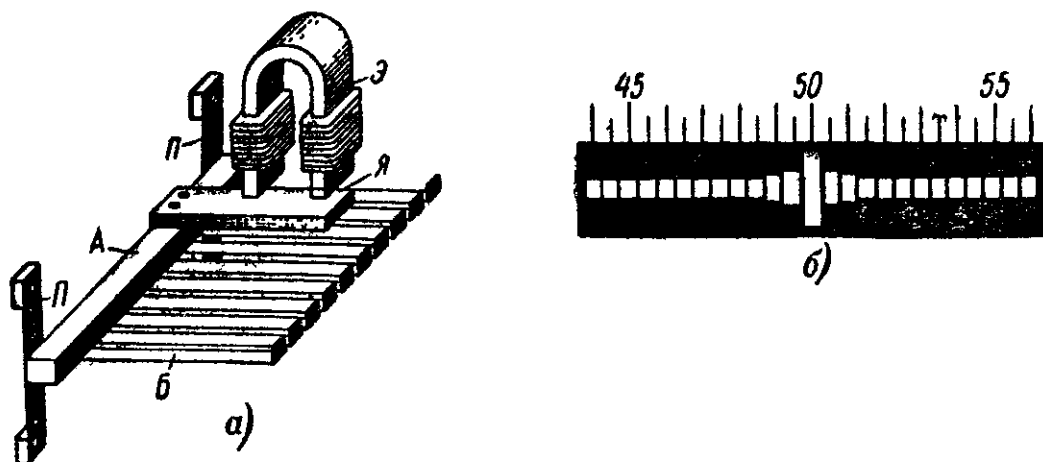


Рис. 13-16. Вибрационный частотомер,
а — схема устройства; б — шкала.

ках ПП. На нижней стороне планки А укреплены упругие пластинки Б, свободные концы которых загнуты под прямым углом.

Переменный ток, проходя по обмотке электромагнита, вызывает силу притяжения якоря к электромагниту.

Сила притяжения $F \propto i^2$ то увеличивается, то ослабевает, дважды в течение периода достигая наибольшего значения. Стальные пластинки Б под действием этой силы испытывают вынужденные колебания, частота которых равна удвоенной частоте переменного тока. Пластинки подбираются с различной частотой собственных колебаний, и та из них, собственная частота которой совпадает с частотой вынужденных колебаний, будет колебаться со значительно большей амплитудой, чем другие пластинки.

На шкале прибора около каждой пластинки указана частота переменного тока, при которой резонирует пластинка. Таким образом, по пластинке, колеблющейся с большей амплитудой, можно определить частоту переменного тока.

Частотомер включается в сеть так же, как вольтметр. На шкале его указывается номинальное напряжение, на которое он рассчитан.

13-8. ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТЫ МОСТОМ

На рис. 13-17 дана схема одного из распространенных мостов для измерения частоты.

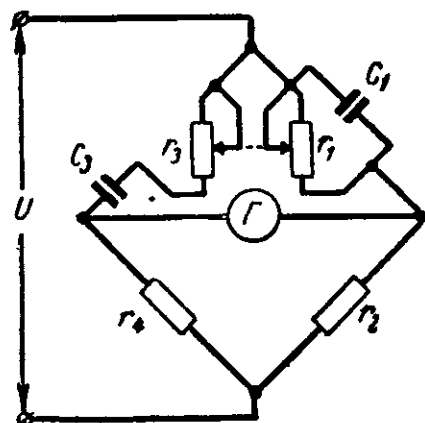


Рис. 13-17. Мост для измерения частоты.

Согласно (10-14) напомним условия равновесия моста:

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3$$

или, так как

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{r_1} + j\omega C_1; \quad Z_2 = r_2; \quad Z_3 = r_3 - j \frac{1}{\omega C_3} \quad \text{и} \quad Z_4 = r_4,$$

то

$$r_4 \frac{r_1}{1 + j\omega C_1 r_1} = r_2 \left(r_3 - j \frac{1}{\omega C_3} \right),$$

откуда получим:

$$\frac{r_4}{r_2} = \frac{r_3}{r_1} + \frac{C_1}{C_3} + j \left(\omega C_1 r_3 - \frac{1}{\omega C_3 r_1} \right).$$

Приравнявая действительные и мнимые части равенства, получаем:

$$\frac{r_4}{r_2} = \frac{r_3}{r_1} + \frac{C_1}{C_3} \tag{13-4}$$

и

$$\omega C_1 r_3 - \frac{1}{\omega C_3 r_1} = 0; \tag{13-5}$$

из последнего равенства

$$\omega^2 = \frac{1}{r_1 r_3 C_1 C_3}$$

или

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{r_1 r_3 C_1 C_3}}.$$

Если выполнить условия

$$r_1 = r_3 = r \text{ и } C_1 = C_3 = C,$$

то согласно (13-4)

$$\frac{r_4}{r_2} = 2 \text{ или } r_4 = 2r_2$$

и измеряемая частота

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{r_1 r_3 C_1 C_3}} = \frac{1}{2\pi r C}. \quad (13-6)$$

Так как емкость C постоянна, то

$$f = k \frac{1}{r} = kg.$$

Таким образом, измеряемая частота пропорциональна проводимости g .

Рукоятки магазинов сопротивлений r_1 и r_3 должны быть механически связаны, с тем чтобы выполнялось условие $r_1 = r_3$.

Наличие гармоник в кривой напряжения, частота которого измеряется, затрудняет уравнивание моста. Уравновешенный на основную частоту мост может оказаться неуравновешенным для высших гармоник.

При использовании в качестве индикатора телефона следует уравнивать мост по пропаданию звука только основного тона. При применении других индикаторов последовательно с ними следует включать фильтры, задерживающие гармоники, так как в противном случае будет затруднено уравнивание моста.

Точность измерений таким мостом 0,1—0,5%.

Он может применяться для измерения частоты от 100 гц до 100 кгц.

Глава четырнадцатая

САМОПИШУЩИЕ ПРИБОРЫ

14-1. НАЗНАЧЕНИЕ САМОПИШУЩИХ ПРИБОРОВ

В ряде случаев для нормальной эксплуатации установки или для правильного ведения технологического процесса необходимо производить запись той или иной измеряемой величины в течение всего времени работы установки.

Приборы, предназначенные для записи измеряемой величины в течение длительного времени, называются самопишущими (регистрирующими) приборами.

Каждый самопишущий прибор имеет измерительный механизм с указателем, положение которого тем или иным способом фиксируется на бумаге, перемещающейся с постоянной скоростью при помощи специального механизма.

По способу записи приборы делятся на две группы:

1) приборы с непрерывной записью и 2) приборы с точечной записью.

14-2. ПРИБОРЫ С НЕПРЕРЫВНОЙ ЗАПИСЬЮ

В приборах с непрерывной записью запись производится чернилами на движущейся бумажной ленте или круглой вращающейся диаграмме.

На рис. 14-1 показано устройство одного из самопишущих приборов с непрерывной записью.

На одной оси с рамкой измерительного механизма укреплен дугообразный держатель 1. На передней части его подвешено капиллярное перо, а над ним укреплена стрелка для отсчета измеряемой величины по шкале прибора. Капиллярное перо (рис. 14-2) в основном представляет собой тонкую стеклянную трубку Г-образной формы. Нижний конец трубки расположен в неподвижно укрепленной дугообразной чернильнице 3 (рис. 14-1), а верхний конец трубки прикасается к бумажной ленте. Под действием капиллярных сил чернила с нижнего конца трубки поднимаются к верхнему концу ее, оставляя след в точке соприкосновения пера с бумагой. Перо прижимается к бумаге силой тяжести, имея возможность вращаться вокруг оси подвеса, что

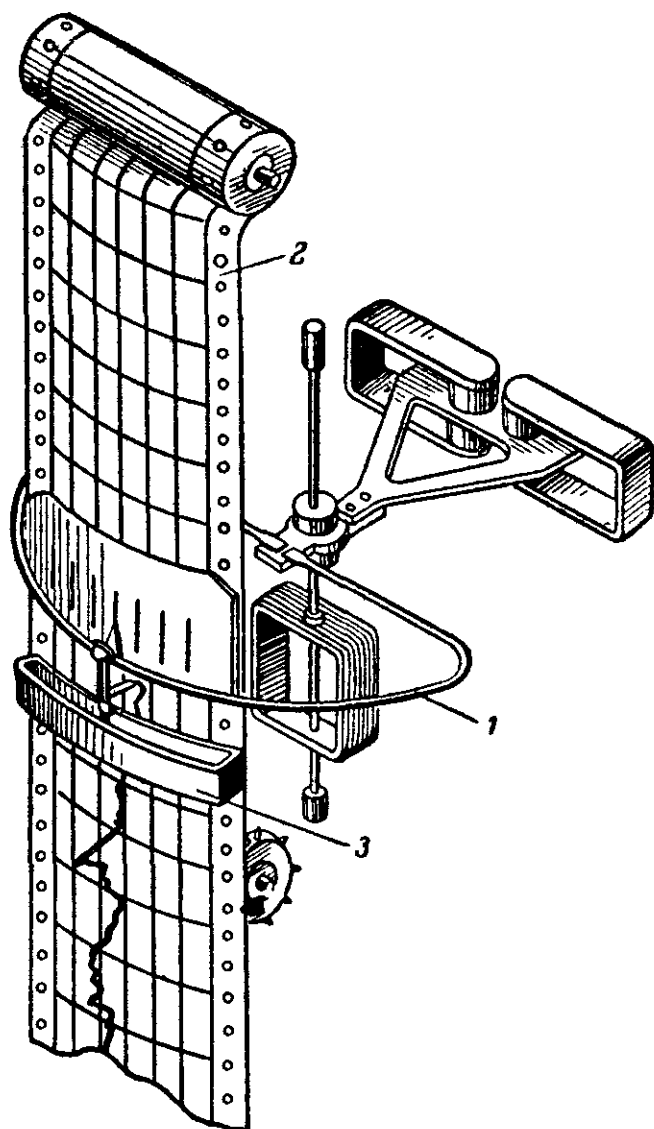


Рис. 14-1. Устройство самопишущего прибора с непрерывной записью с дугообразным стрелкодержателем.

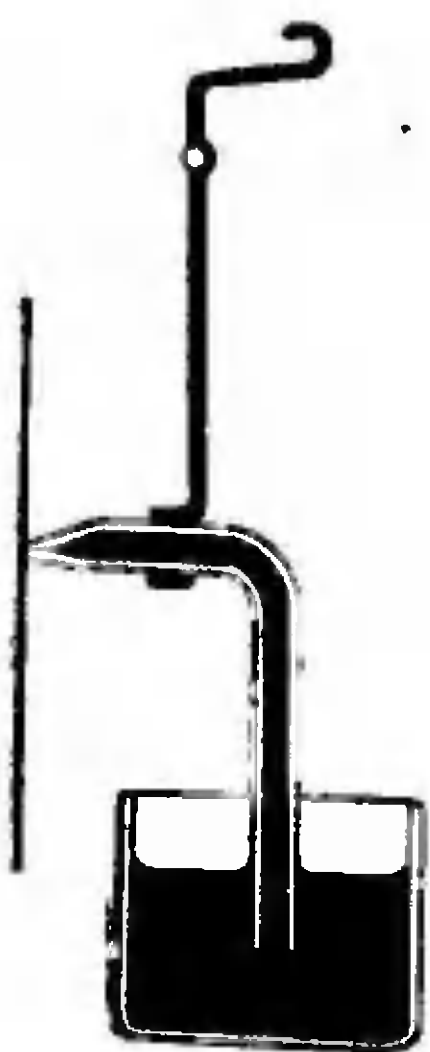


Рис. 14-2.
Капилляр-
ное перо
с непо-
движной
черниль-
ницей.

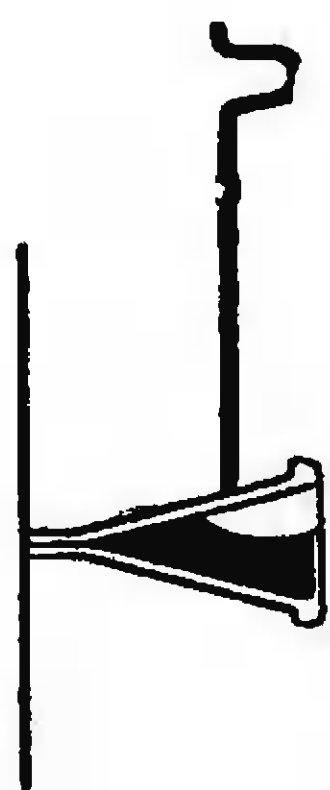


Рис. 14-3.
Перо с чер-
нильницей.

обеспечивает ему возможность свободно перемещаться по неровности бумаги.

Бумажная лента — диаграммная бумага, на которой производится запись, расположена на цилиндрической поверхности, ось которой совпадает с осью подвижной части прибора. Диаграммная бумага при помощи небольшого синхронного электродвигателя или часового механизма перемещается сверху вниз с постоянной скоростью.

При движении пера в горизонтальной плоскости и одновременном движении бумаги в перпендикулярном направлении (сверху вниз) перо вычерчивает кривую изменений во времени регистрируемой величины в прямоугольных координатах.

На рис. 14-3 показано перо, одновременно являющееся и чернильницей. Главная часть его — тонкостенный конус, имеющий вверху отверстие для заполнения

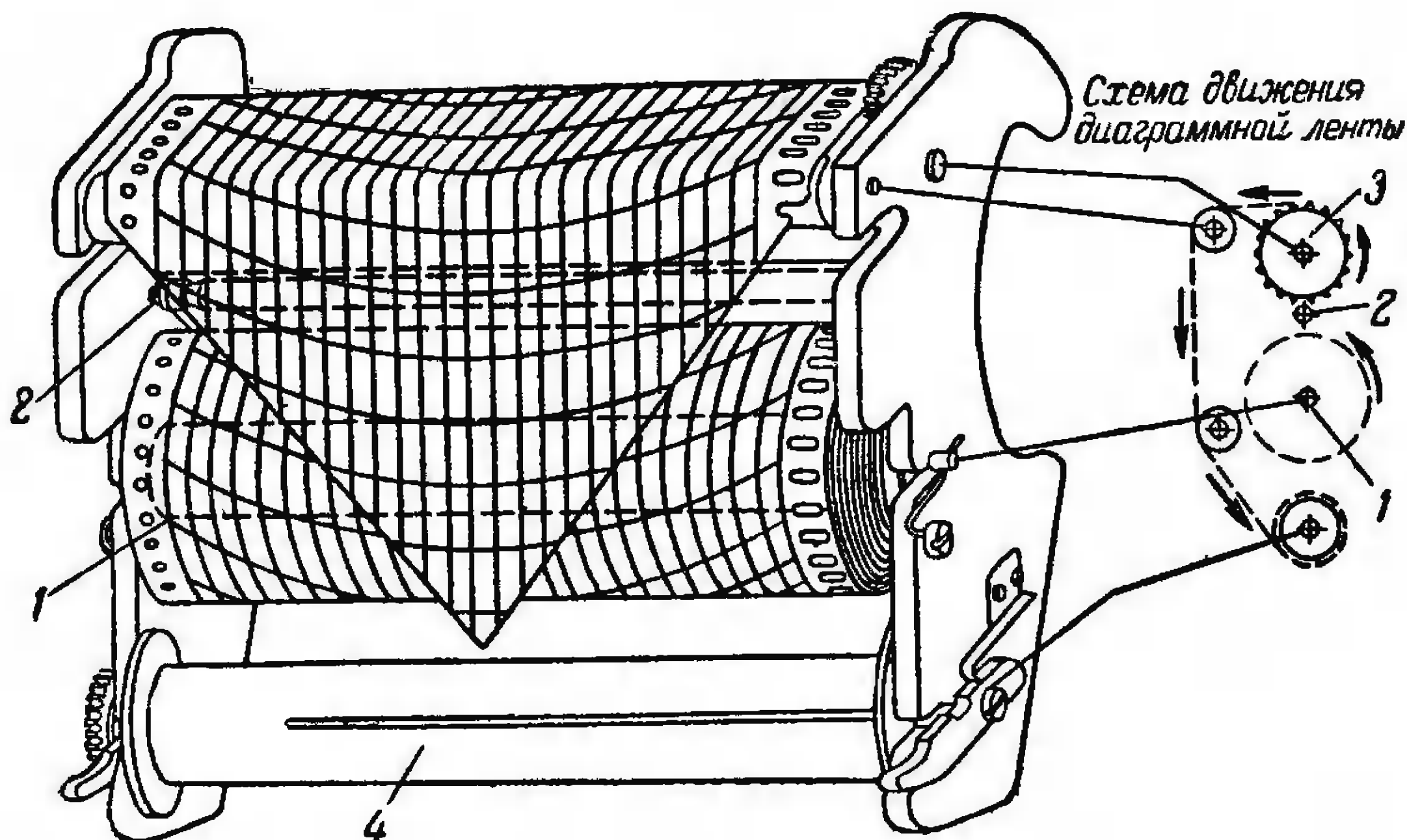


Рис. 14-4. Схема устройства лентопротяжного механизма Краснодарского завода.

его чернилами, а в вершине конуса — отверстие для переноса чернил на бумагу. Так же как и капиллярное перо, конусообразное перо-чернильница подвешивается свободно с таким расчетом, чтобы сила тяжести прижимала его к бумаге. Применяются перья и иного устройства.

На рис. 14-4 дана схема устройства лентопротяжного механизма, применяемого в самопишущих приборах

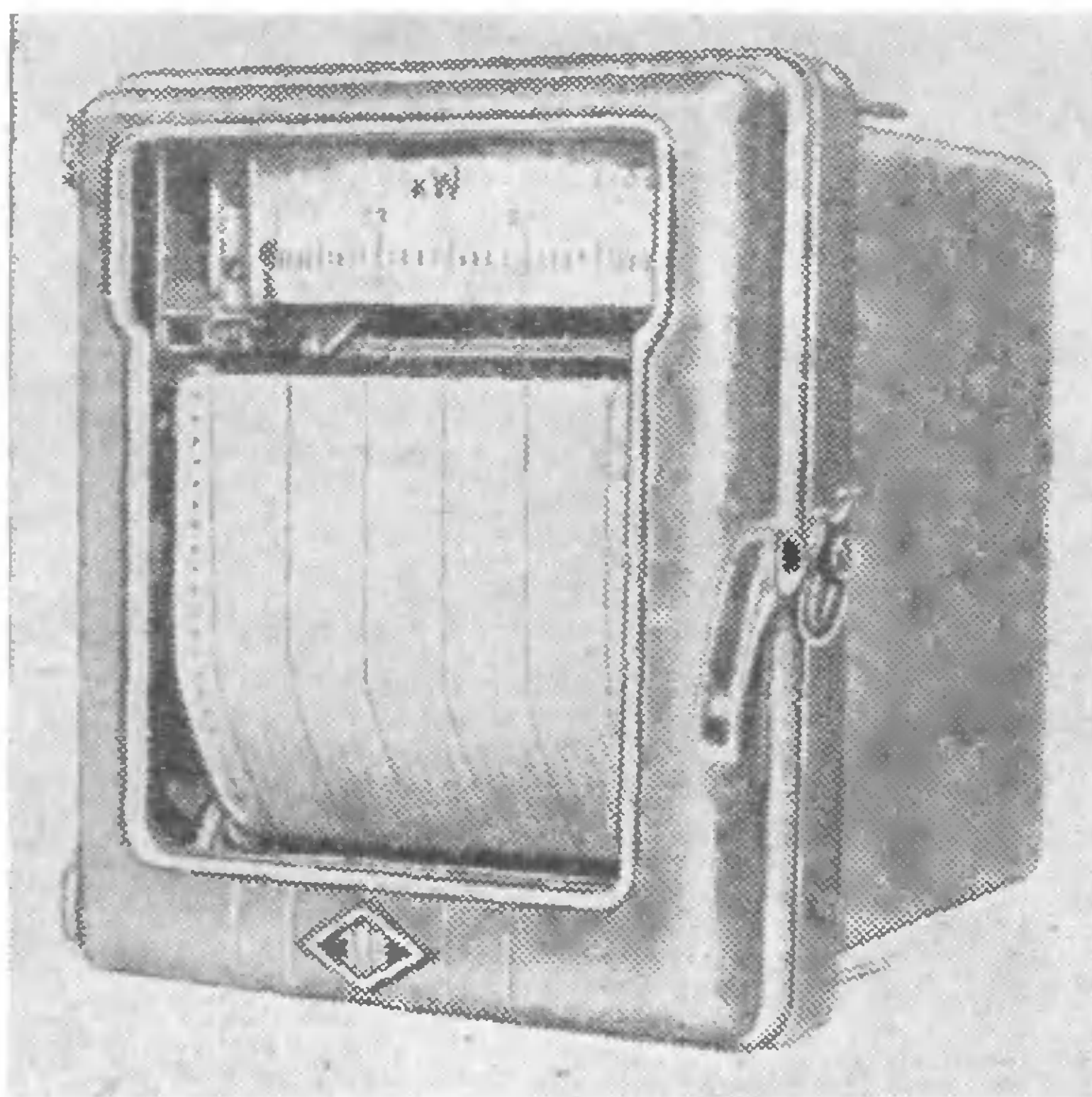


Рис. 14-5. Самопишущий прибор Краснодарского завода.

Краснодарского завода измерительных приборов (ЗИП).

Перфорированная диаграммная бумага сматывается с рулона 1 и, пройдя ролик 2, поступает на тянущий барабан 3 со штифтами для перфорационных отверстий и, наконец, поступает на собирающую катушку 4. Тянущий барабан и собирающая катушка приводятся в движение небольшим синхронным электродвигателем. Запись производится на верхней, горизонтально расположенной части бумаги. Диаграмма в отличие от предыдущей получается в криволинейных координатах. На

рис. 14-5 показан внешний вид самопишущего прибора Краснодарского завода.

На рис. 14-6 дана схема выпрямляющего эллиптического устройства самопишущего прибора.

На одной оси с катушкой 1 измерительного механизма укреплен рычажок, который в точке 4 шарнирно связан со стрелкой. Верхний конец стрелки при вращении подвижной части свободно перемещается в вертикаль-

ном направлении между параллелями 5, в то время как нижний конец ее, несущий перо 2, при известных соотношениях длины рычажка и участков стрелки 2—4 и 4—5

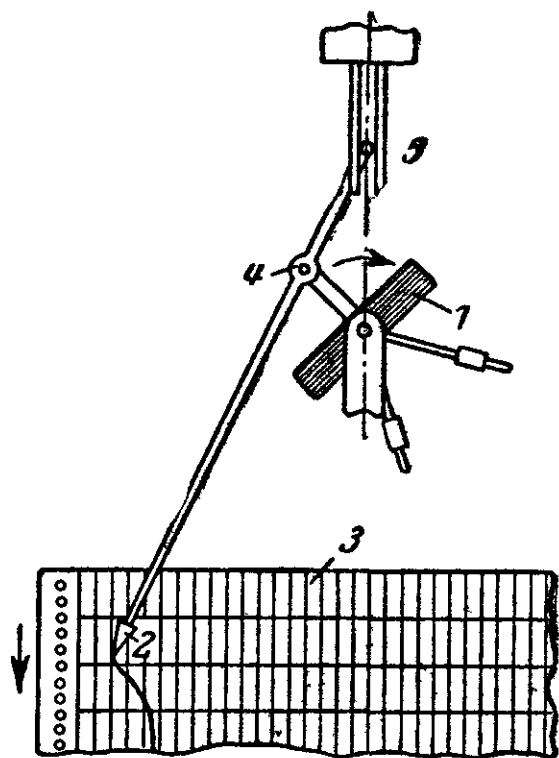


Рис. 14-6. Выпрямляющее эллиптическое устройство.

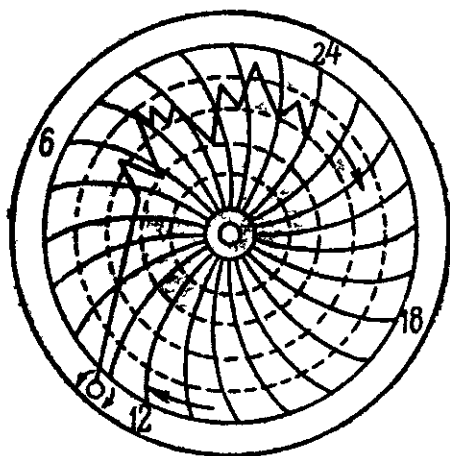


Рис. 14-7. Круговая диаграмма.

будет перемещаться в горизонтальной плоскости. При этом движении перо конусообразной формы, прикасаясь к бумаге, перемещающейся сверху вниз, фиксирует значение измеряемой величины, вычерчивая кривую в прямоугольных координатах.

Бумажная лента приводится в движение аналогично предыдущим.

В других приборах запись измеряемой величины производится на круглой бумажной диаграмме (рис. 14-7), которая укрепляется на диске, приводимом во вращение от часового механизма или синхронного электродвигателя.

14-3. ПРИБОРЫ С ТОЧЕЧНОЙ ЗАПИСЬЮ

На рис. 14-8 дана схема устройства прибора с точечной записью. В этих приборах диаграммная бумага приводится в действие с постоянной скоростью, так же как и в приборах с непрерывной записью.

Над валиком, через который переброшена диаграммная бумага, расположена красящая лента *Л*. Над лентой свободно перемещается конец указательной стрелки, укрепленной на оси подвижной части измерительного механизма. Указательная стрелка всегда занимает положение, соответствующее значению измеряемой величины. Над указательной стрелкой расположена дуга *Д*, которая периодически несколько раз в минуту падает на стрелку и поднимается. При падении дуга прижимает стрелку к красящей ленте и бумаге, вследствие чего на бумаге появляется точка, отмечающая положение стрелки, а следовательно, и значение измеряемой величины.

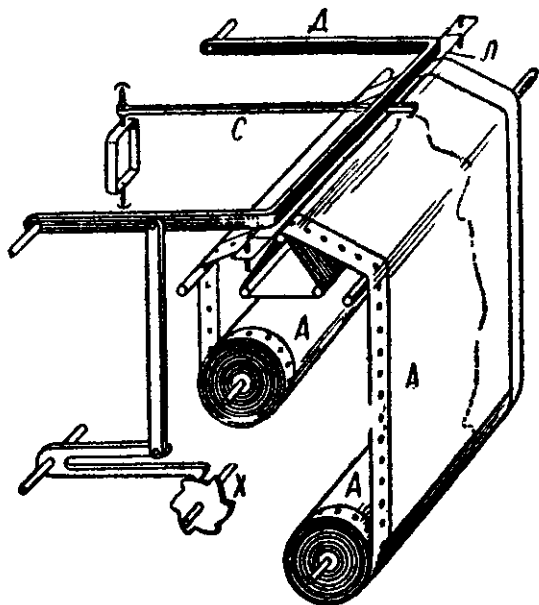


Рис. 14-8 Схема самопишущего прибора с точечной записью.

Точечная запись дает возможность одновременного получения кривых нескольких измеряемых величин.

На рис. 14-9 дано устройство прибора для одновременной записи шести кривых, соответствующих шести различным измеряемым величинам.

Синхронный двигатель (*ДВ*) небольшой мощности приводит во вращение лентопротяжный механизм, вызывающий перемещение диаграммной бумаги *А*. Одновременно вращение кулачка *1* вызывает периодический подъем и падение на стрелку дуги *Д*. Перед каждым падением дуги механизма *2* шагообразно перемещает переключатель *П*, чем достигается подключение к рамке измерительного механизма *И* той или иной измерительной цепи и одновременно шагообразное движение кулачка *3* изменяет положение рычага переключателя *Р*

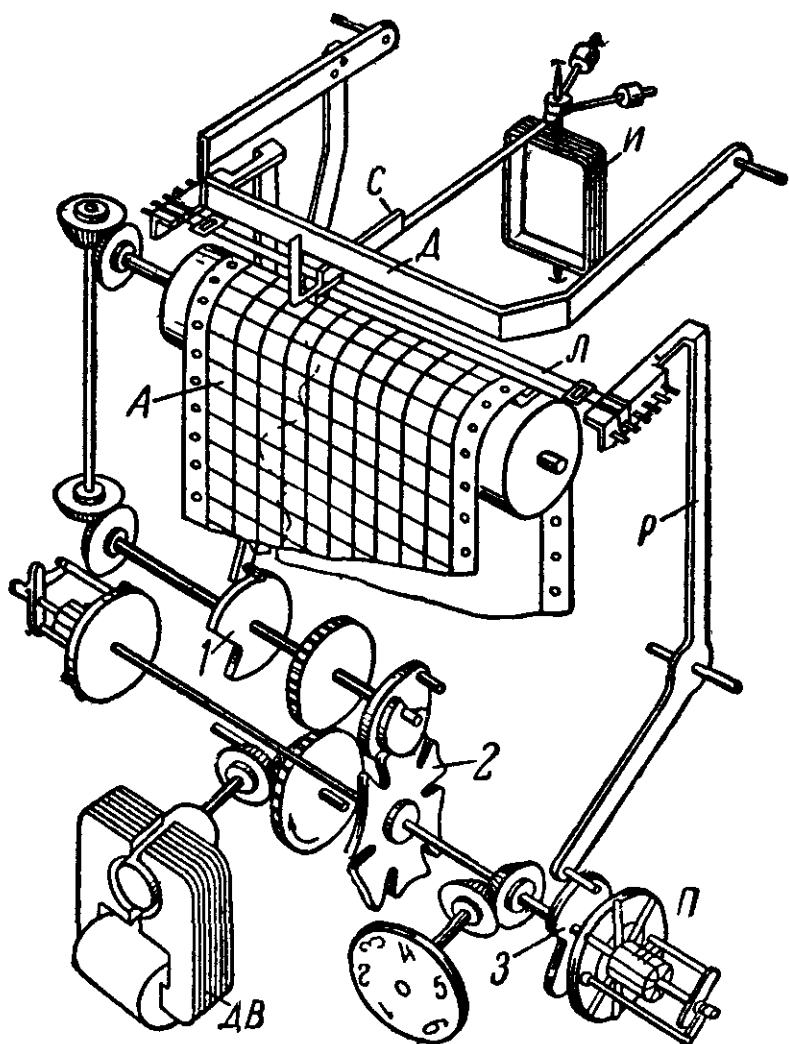


Рис 14-9 Схема прибора для одновременной записи шести измеряемых величин

с разноцветными красящими лентами \mathcal{L} , обеспечивая для каждой измерительной цепи ленту определенного цвета.

После полного оборота механизма 2, в течение которого каждая из шести измеряемых величин фиксируется одной точкой, процесс записи повторяется в той же последовательности; каждая пунктирная кривая будет иметь свой цвет, что облегчает чтение кривых.

14-4. ПРИБОРЫ ДЛЯ ЗАПИСИ НОРМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ

При нормальном режиме работы установки для записи электрических величин, характеризующих ее работу, достаточно иметь в самопишущем приборе скорость движения диаграммной бумаги 20—60 мм/ч.

При аварийных режимах, когда скорость изменения режима работы установки возрастает, необходимо иметь значительно бóльшую скорость движения бумаги. Краснодарским заводом измерительных приборов изготавливаются специальные самопишущие амперметры и вольтметры (тип Н-385) и частотомеры (тип Н-388), предназначенные для работы как при нормальных, так и при аварийных режимах.

Они являются приборами выпрямительной системы. Их измерительный механизм магнитоэлектрической системы отличается от обычного наличием на подвижной части второй рамки, замкнутой на сопротивление и предназначенной для успокоения. Таким образом, успокоение в приборах создается двумя рамками, вследствие чего время успокоения снижено до 0,2 сек.

В таких приборах для движения бумаги применен импульсный электромагнитный механизм (импульсный двигатель). При каждом импульсе диаграммная бумага перемещается на $\frac{1}{3}$ мм. Импульсы подаются от датчиков импульсов (приставка Р-335).

Обычно работает датчик импульсов нормального режима, дающий 180 импульсов в час, что соответствует скорости движения бумаги 60 мм/ч.

При нарушении нормального режима работы установки реле, включенное в измеряемую цепь, посылает импульс тока на исполнительное реле (приставка Р-335), и происходит включение второго датчика — датчика аварийного режима, который подает на импульсный электромагнитный механизм 30 импульсов в секунду, что соответствует движению бумаги со скоростью 36 000 мм/ч, т. е. со скоростью, в 600 раз большей, чем при нормальном режиме. Такая скорость сохраняется в течение 24 сек., после чего автоматически включается датчик импульсов нормального режима. Если через 6 сек после первого импульса на исполнительное реле будет подан второй импульс, то датчик аварийного режима продолжает свою работу еще на 24 сек.

Рассмотренные амперметры и вольтметры имеют класс точности 1,5, а частотомеры — 0,5.

14-5. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Измерительный механизм самопишущего прибора может быть любой системы, но наибольшее распространение получили измерительные механизмы магнито-электрической и ферродинамической систем.

Измерительный механизм самопишущего прибора с непрерывной записью должен обладать значительно большим вращающим моментом, чем у показывающих приборов, с тем, чтобы момент трения пера о бумагу не вызывал увеличения погрешности прибора выше допустимых границ.

При точечной записи дополнительное трение пера о бумагу отсутствует и, следовательно, в этих приборах нет надобности в увеличенном вращающем моменте.

По указанным причинам непрерывная запись применяется только для таких величин (ток, напряжение, мощность и т. д.), которые могут сообщить измерителю самопишущего прибора достаточную мощность.

Если измеряемая величина мала и получение от измерительной цепи надлежащей мощности невозможно, то применяют приборы с точечной записью или приборы, в которых для записи применяются специальные двигатели, а измеряемая величина используется только для управления этим двигателем.

Недостаток точечной записи — ее прерывность; запись производится с перерывами до 1 мин, что не всегда приемлемо.

В самопишущих приборах диаграммная бумага приводится в движение от специального двигателя или от часового механизма, или от центральных электрических часов (при наличии нескольких самопишущих приборов).

Бумага для записи кривых закладывается в прибор в виде рулона. Длина бумаги составляет 10—50 м при ширине 100—120 мм и больше. При этой ширине с одной стороны бумаги проштамповываются отверстия (перфорация), в которые входят штифты тянущего механизма. В приборах, в которых бумага изгибается по цилиндрической поверхности (рис. 14-1), а также при большой ширине бумаги, перфорация делается с двух сторон.

Скорость движения бумаги должна соответствовать скорости изменения регистрируемой величины. Чем быстрее изменяется последняя, тем больше должна быть скорость движения бумаги.

Хорошая запись получается при скорости движения бумаги, в 30—60 раз большей максимальной скорости движения пера.

Скорость движения бумаги колеблется в весьма широких границах: 20—36 000 мм/ч.

Изменение скорости обычно достигается применением сменных шестеренок.

Качество записи в сильной степени зависит от качества бумаги, которая должна удовлетворять определенным требованиям.

Для записи применяют обычно чернила фиолетового цвета. Они содержат некоторое количество глицерина и сахара, что препятствует высыханию. Чернила должны возможно медленнее высыхать в чернильнице и быстро сохнуть на бумаге. Вязкость чернил должна соответствовать типу пера.

Для записи с небольшой скоростью применяются капиллярные перья (рис. 14-2) и неподвижные чернильницы. При небольших скоростях эти перья дают непрерывную тонкую линию. При больших скоростях капилляр не успевает подавать чернила и запись получается прерывистой.

Для разных скоростей применяют капилляры разного диаметра. При больших скоростях записи применяются перья, совмещаемые с чернильницами (рис. 14-3).

Перед наполнением пера чернилами его следует промывать водой или спиртом. Перья ни в коем случае нельзя прочищать чем-либо, кроме специальных приспособлений; в противном случае можно легко повредить перо.

Глава пятнадцатая

ОСЦИЛЛОГРАФЫ

15-1. НАЗНАЧЕНИЕ ОСЦИЛЛОГРАФОВ

Осциллографом называется прибор, предназначенный для записи кривых быстро изменяющихся электрических величин.

Осциллографы можно разделить на две группы:

а) осциллографы электромеханические, подвижная часть измерительного механизма которых обладает инерцией;

б) осциллографы электронные, подвижная часть которых образуется пучком электронов и практически не обладает инерцией.

Первые применяются для исследования периодически изменяющихся электрических величин с частотой до 1—2 кГц или непериодических изменений электрических величин длительностью до 1 мсек.

Вторые могут применяться для исследования величин с частотой от нескольких герц до нескольких сотен мегагерц или для исследования непериодических явлений длительностью до долей микросекунды.

Измерительные механизмы электромеханических осциллографов делятся на следующие системы:

- 1) магнитоэлектрическая;
- 2) ферродинамическая;
- 3) электростатическая.

Из перечисленных систем измерительных механизмов наиболее распространенной является магнитоэлектрическая система.

15-2. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ МЕХАНИЗМОМ

Электромеханический осциллограф состоит из нескольких узлов: измерительных механизмов — вибраторов, оптической системы, приспособлений для фотографирования, приспособлений для визуального наблюдения исследуемого процесса и электрической схемы.

Вибратор петлевой магнитоэлектрической системы (рис. 15-1) состоит из постоянного магнита, в поле которого расположена натянутая петля 2, выполненная из бронзовой ленточки. Петля опирается на две призмы 3 и натягивается пружинкой 4. На середине петли укреплено маленькое зеркальце 5. Этот механизм заключен в пластмассовый корпус, заполняемый специальной прозрачной кремнийорганической жидкостью, предназначенной для успокоения. В корпусе против зеркала вибратора имеется окно для прохода лучей света.

Оптическая система состоит из осветительной лампы накаливания и набора диафрагм, зеркал и линз, обеспечивающих прохождение световых лучей в нужном направлении.

При прохождении по петле вибратора исследуемого электрического тока он будет взаимодействовать с полем постоянного магнита, вследствие чего на каждую

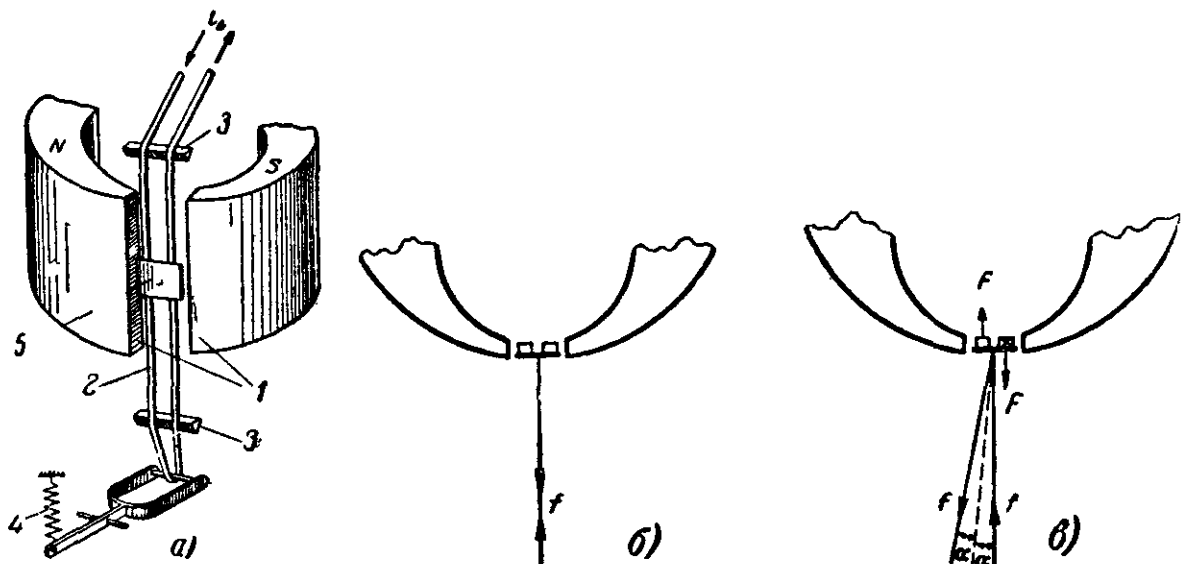


Рис. 15-1. Подвижная и неподвижная части вибратора магнито-электрической системы.

из сторон петли будут действовать силы FF , образующие вращающий момент, который при малых углах поворота, как и для измерительного механизма магнито-электрической системы, может быть выражен [см. (4-1)] $M = iBS\omega$. Этот момент будет вызывать отклонение петли и поворот укрепленного на ней зеркальца. При малом моменте инерции и большой собственной частоте колебаний вибратора (1 000—20 000 гц) угол отклонения зеркальца в каждый момент времени будет пропорционален мгновенному значению исследуемого тока.

Если пропустить по вибратору периодически изменяющийся ток, то петля с зеркальцем придет в колебательное движение. Если при этом направить на зеркальце луч света f , а на пути отраженного луча поместить светочувствительную пленку (кинопленку) или фотобумагу, укрепленную на цилиндре 7 (рис. 15-2), то при отсутствии движения пленки на ней получится (после проявления) горизонтально расположенная прямая линия,

длина которой будет равна перемещению отраженного от зеркальца луча света и которая будет пропорциональна сумме положительной и отрицательной амплитуд тока.

Для того чтобы линия была тонкой и резко очерченной, применяется линза 6, собирающая луч в фокусе, расположенном на поверхности пленки.

При вращении цилиндра с пленкой при неподвижной

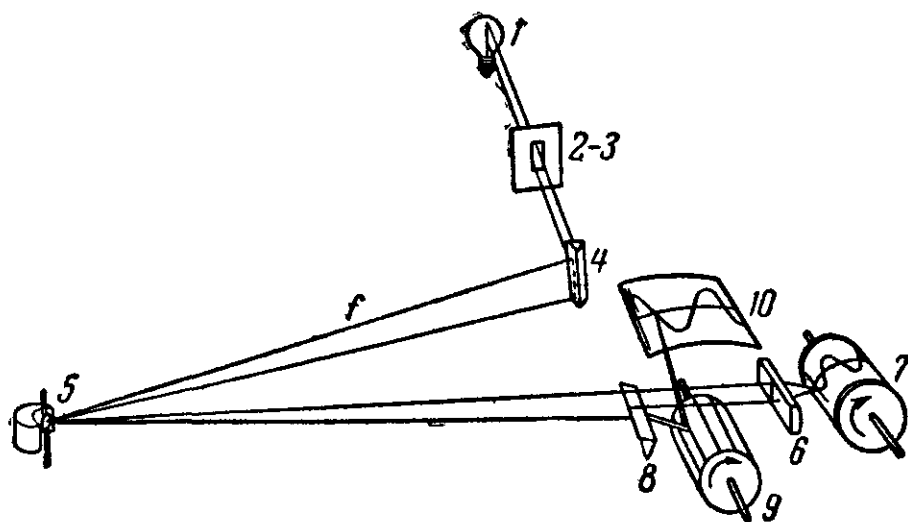


Рис. 15-2. Общая схема устройства и работы электромеханического осциллографа.

петле, а следовательно, и луче на пленке получится прямая линия, перпендикулярная первой.

При одновременном движении луча света, идущего от зеркальца вибратора, и равномерном вращении цилиндра 7 с постоянной скоростью луч света вычертит на пленке кривую исследуемого тока, идущего по вибратору.

Такая кривая, записанная на кинопленке или фотобумаге, носит название осциллограммы (рис. 15-3).

Масштаб ординат кривой тока определяется по данной заводом чувствительности вибратора, или его можно определить, пропуская по вибратору ток известной величины и измеряя соответствующие этому току ординаты кривой.

Для определения масштаба времени (абсцисс кривой) применяют специальные отметчики времени. Отметчик времени состоит из электромагнита, якорек которого колеблется с известной постоянной частотой, например 500 гц. Механизм отметчика помещается в та-

ком же пластмассовом корпусе, как и вибратор. Отраженный от зеркала отметчика луч света дает на пленке запись вспомогательной кривой с известным периодом (рис. 15-3). Масштаб времени также можно определить, если по одному из вибраторов проходит ток известной частоты, а следовательно, с известным периодом.

При записи напряжения последовательно с вибратором включается безреактивное добавочное сопротивление

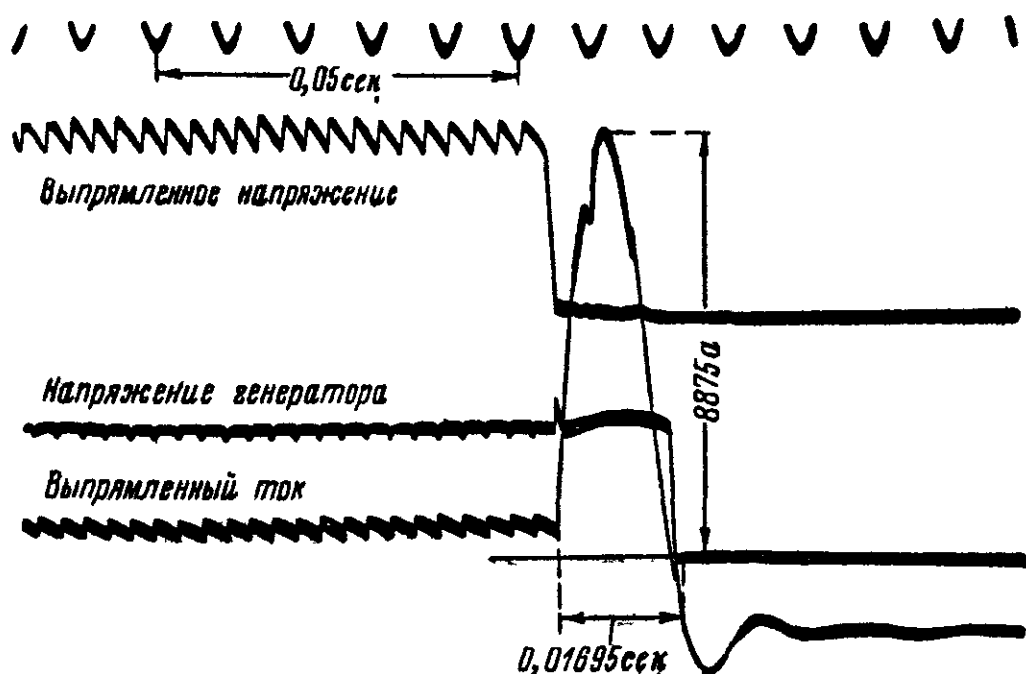


Рис. 15-3. Осциллограмма напряжения и тока ртутного выпрямителя при коротком замыкании.

ние. В этом случае ток в вибраторе в каждый момент времени будет пропорционален мгновенной величине напряжения, и, следовательно, полученная кривая в соответствующем масштабе будет представлять собой кривую напряжения, действующего на зажимах цепи данного вибратора.

Обычно вибраторы осциллографа рассчитываются на номинальный ток не выше 100 *ма*.

При исследовании токов больше номинального применяются шунты.

Для производства визуальных наблюдений часть пучка световых лучей, идущих от зеркала вибратора, при помощи линзы 8 (рис. 15-2) отделяется и направляется на вращающуюся многогранную зеркальную

призму 9, после отражения от которой попадает на матовый экран 10 с нижней стороны его, в то время как глаз наблюдателя располагается над экраном.

При неподвижной зеркальной призме и колебании зеркальца вибратора луч света, падающий на экран, вычертит на нем прямую светлую линию, параллельную оси призмы.

При неподвижном зеркальце вибратора и вращающейся призме луч вычертит на экране прямую светлую

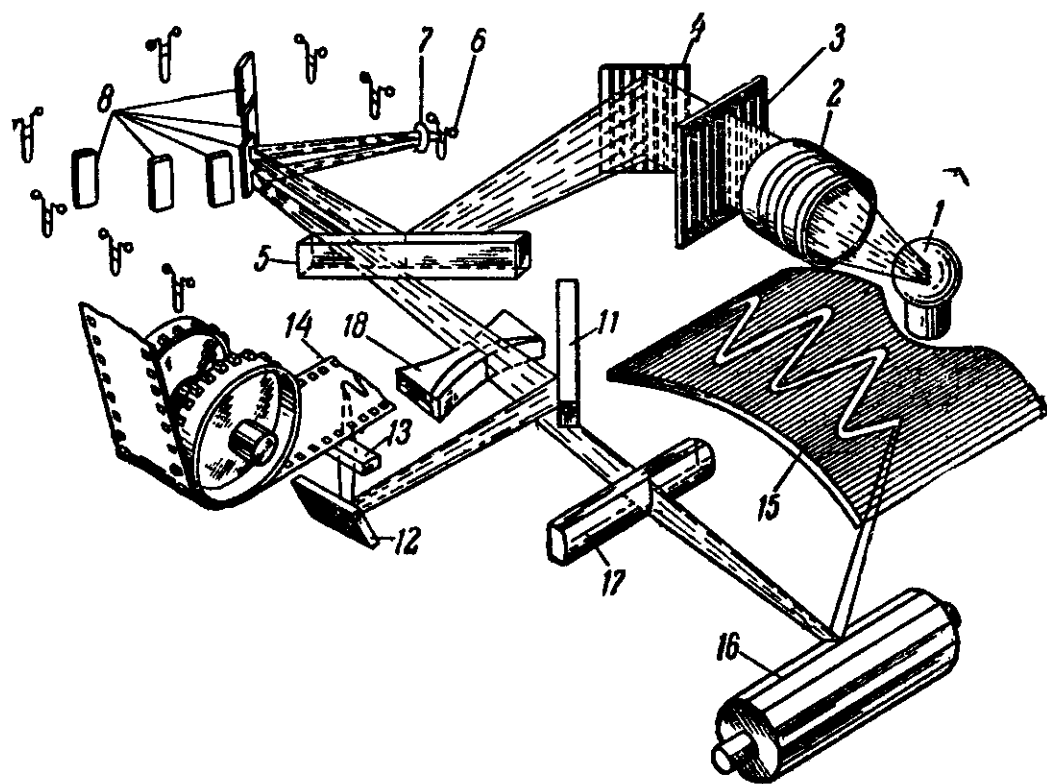


Рис. 15-4. Схема работы осциллографа типа МПО-2.

линию, перпендикулярную первой. При одновременном действии, т. е. при вращении призмы и колебании зеркальца, луч света будет вычерчивать на экране кривую изменения исследуемой величины.

На рис. 15-4 дана схема оптического устройства наиболее распространенного в СССР восьмивибраторного универсального осциллографа типа МПО-2.

Это устройство включает в себя лампу 1, пучок света которой проходит конденсаторную линзу 2 и диафрагму 3. Последняя делит пучок света на восемь частей. Эти пучки, отражаясь от зеркал 4, 5 и 8, через линзы вибраторов 7 попадают на зеркала вибраторов 6. Лучи света,

отраженные от зеркал вибраторов, проходят линзы 7 и попадают непосредственно или после отражения от зеркал 8 частично на зеркало 11 и частично на сферическую линзу 18. Часть луча света, попавшая на зеркало 11, после отражения от него и зеркала 12 фокусируется линзой 13 на пленку 14. Другая часть луча света, проходя через линзы 18 и 17, попадает на зеркальный многогранник, после отражения от которого падает на экран 15.

Этот осциллограф дает возможность фотографировать и наблюдать одновременно восемь исследуемых величин.

Пленка и зеркальный барабан приводятся во вращение от однофазного асинхронного двигателя. Коробка скоростей, имеющая 12 ступеней, дает возможность иметь различные скорости движения пленки в пределах 1—5 000 мм/сек. В зарядную кассету может быть заложена пленка длиной до 5 м.

Все узлы осциллографа смонтированы в металлическом кожухе, имеющем вид чемодана размером 550×380×200 мм.

Кроме рассмотренного петлевого вибратора магнитоэлектрической системы, применяется также рамочный вибратор той же системы. Подвижная часть его выполняется в виде очень узкой рамки с небольшим числом витков ω , не превышающим несколько десятков. Рамка крепится на растяжках.

Вибраторы мощности имеют ферродинамическую систему.

На кольцевой сердечник из пермаллоя накладывается неподвижная токовая обмотка. В воздушном зазоре этого сердечника расположена петля с укрепленным на ней зеркальцем. Механизм заключен в пластмассовый корпус, заполненный прозрачной жидкостью для успокоения.

Включив неподвижную обмотку в цепь тока, а петлю вибратора с последовательно соединенным безреактивным добавочным сопротивлением на напряжение цепи, получим вращающий момент вибратора, пропорциональный мгновенной мощности цепи

$$M = k_1 i i_U = k_1 i \frac{u}{r_U} = k_2 i u = k_2 p.$$

Таким образом, угол поворота зеркала будет пропорционален мгновенной мощности цепи.

При каждом осциллографе имеется набор вибраторов различных типов, отличающихся друг от друга чувствительностью и частотой собственных колебаний.

Чувствительность вибратора, как и чувствительность магнитоэлектрического измерительного механизма, может быть записана так:

$$S_I = \frac{\alpha}{I} = \frac{BSw}{D},$$

а частота собственных колебаний

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{D}{J}},$$

где J — момент инерции подвижной части.

Повышение частоты собственных колебаний достигается увеличением удельного противодействующего момента D , что влечет за собой уменьшение чувствительности вибратора, таким образом высокочастотный вибратор имеет малую чувствительность и, наоборот, высокочувствительный — малую частоту собственных колебаний (табл. 15-1).

Таблица 15-1

Вибраторы типа МОВ-2

Тип вибра- тора	Номиналь- ная частота собст- венных колебаний в воздухе, гц	Номинальная чувствитель- ность		Сопротив- ление ви- братора, ом	Макси- мально допусти- мое ампли- тудное значение тока в ви- браторе, ма	Макси- мально допусти- мое откло- нение на экране в одну сто- рону, мм	Примеча- ние
		на пленке, мм/ма	на экране, мм/ма				
I	5 000	0,2	0,8	3,5	100	100	Петлевые
II	10 000	0,04	0,16	3,0	150	25	
IV	3 000	1,00	4,0	6,0	25	100	
V	2 000	2,5	10,0	6,0	10	100	
VII	2 000	0,015	0,06	1,5	250	12	
VIII	1 000	13,0	52,0	14,0	2	100	Рамочные
IX	400	62,0	250,0	50,0	0,4	100	
X	200	250,0	1 000	50,0	0,1	100	

Чувствительность рамочных вибраторов значительно больше, чем у петлевых, но они обладают низкой частотой собственных колебаний.

Вибраторы невысокой чувствительности (0,2—1,2 мм/ма) с небольшой частотой собственных колебаний (2 000—6 000 гц) и являются наиболее универсальными, устойчивыми в работе и обладают меньшей чувствительностью к перегрузкам и поэтому применяются наиболее часто.

При выборе вибратора для работы следует придерживаться практического правила, согласно которому вибратор записывает без искажений колебания с частотой не выше $\frac{1}{5}$ — $\frac{1}{10}$ частоты собственных колебаний в воздухе. Так, например, вибратор 1 (табл. 15-1) с частотой собственных колебаний 5 000 гц дает неискаженную запись колебаний с частотой до 500 гц, т. е. 10 первых гармоник стандартного 50-периодного тока или напряжения, что в большинстве случаев является достаточным.

При работе в цепях с большей частотой берут соответственно более высокочастотные вибраторы.

Выбрав вибратор по частоте, необходимо убедиться в его достаточной чувствительности по току.

Если чувствительность недостаточна и нет вибратора большей чувствительности, удовлетворяющего также требованиям в отношении частоты, то необходимо применить усилитель.

15-3. ЭЛЕКТРОННЫЕ ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Электронные осциллографы по способу получения электронного луча делятся на осциллографы с холодным катодом и осциллографы с накалимым катодом.

В первом случае для получения электронного луча используется явление электростатической (автоэлектронной) эмиссии, для чего между катодом и анодом создается электрическое поле с большой напряженностью, что требует применения высокого напряжения (30—70 кв). Эти осциллографы имеют ограниченную область применения — высоковольтная измерительная техника — и рассмотрение их выходит за рамки данного курса.

Во втором случае для получения электронного луча используется явление термоэлектронной эмиссии.

В последнее время электронные осциллографы с нагретым катодом получили широкое применение.

Основной частью такого осциллографа является электроно-лучевая трубка (рис. 15-5).

Она представляет собой стеклянную колбу, в которой создан вакуум. Внутри колбы расположены: ка-

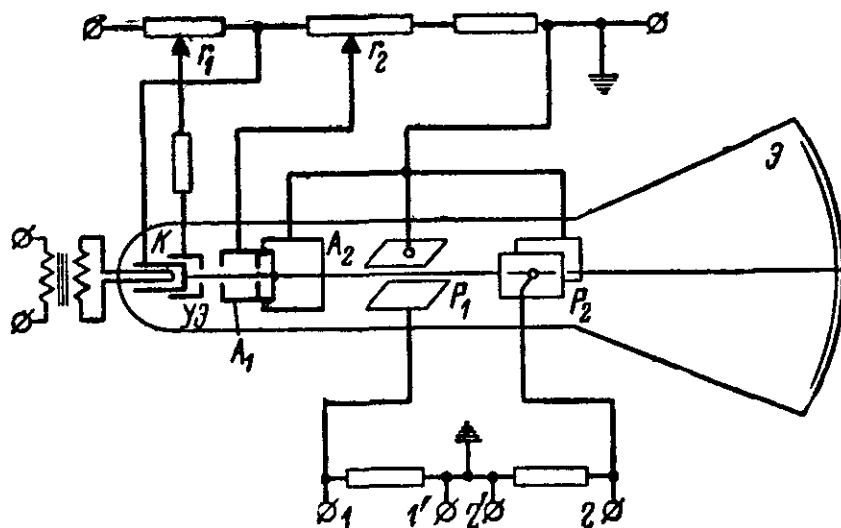


Рис. 15-5. Электроно-лучевая трубка.

тод K , управляющий электрод $УЭ$, два анода A_1 и A_2 и две пары отклоняющих пластин P_1 и P_2 , расположенные в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Внутренняя поверхность расширенного торца колбы покрыта тонким слоем люминофора, например сернистого цинка (ZnS), образуя экран $Э$.

Катод трубки представляет собой металлический цилиндр с оксидным покрытием торца, чем достигается излучение электронов в одном направлении. Этот цилиндр надевается на тонкую фарфоровую трубку, внутри которой помещается биспиральная нить подогрева. Для придания потоку электронов, излучаемых катодом, формы электронного луча, а также для регулировки количества электронов в луче катод окружают управляющим электродом (сеткой), имеющим форму цилиндра с отверстием в торцевой части (рис. 15-6). Управляющий электрод имеет отрицательный потенциал относительно катода. Электроны, вылетевшие из катода, например из точки a в направлении aa' , под действием

электрического поля изменяют свое направление и будут перемещаться в направлении $бв$, т. е. электроны будут отклоняться электрическим полем к оси луча. Если увеличить отрицательный потенциал управляющего электрода, то часть электронов получит еще большее отклонение и не пройдет через отверстие электрода. Таким образом, изменяя потенциал управляющего электрода, можно регулировать количество электронов в луче, а следовательно, и яркость пятна на экране.

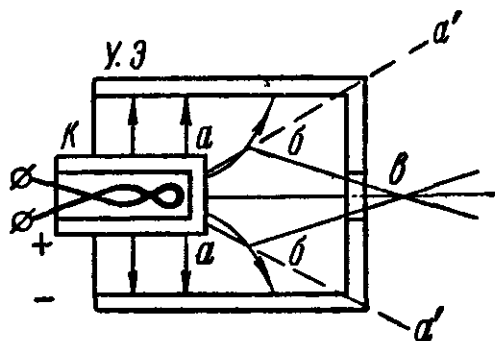


Рис. 15-6. Катод и управляющий электрод.

Пройдя управляющий электрод, электроны опять будут отклоняться от оси луча.

Для дальнейшей фокусировки луча применяются два анода: A_1 и A_2 (рис. 15-7). Первый анод цилиндрический, с двумя или тремя диафрагмами, второй — также цилиндрический, но большего диаметра и без диа-

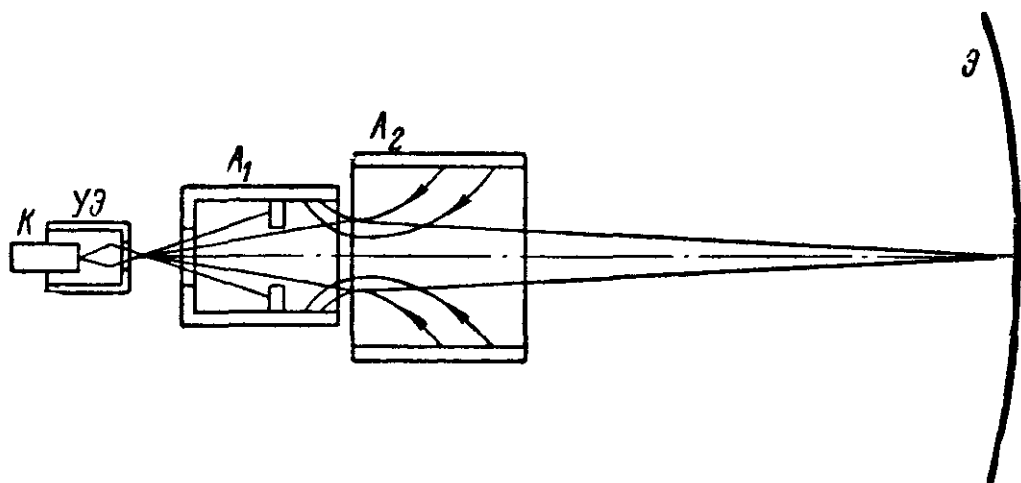


Рис. 15-7. Фокусировка электронного луча.

фрагм. Оба анода имеют положительные потенциалы относительно катода, первый из них — меньший (0,2—1 кВ), а второй — больший (1—4 кВ). Между анодами создается электрическое поле. Электроны, попадая в это поле, отклоняются в направлении к оси луча и получают ускорение в направлении движения. Таким образом, поле между анодами A_1 и A_2 действует на

электронный луч как собирающая линза, фокусируя его в точке, лежащей на оси трубки вблизи экрана Э или на самом экране (рис. 15-5 и 15-7). В этом последнем случае на экране будет видно очень маленькое резко очерченное светящееся пятно. Изменение фокусного расстояния производится регулировкой потенциала первого анода.

Часть электронно-лучевой трубки, состоящая из катода, управляющего электрода и анодов, обеспечивающая получение электронного луча, называется электронной пушкой или электронным прожектором.

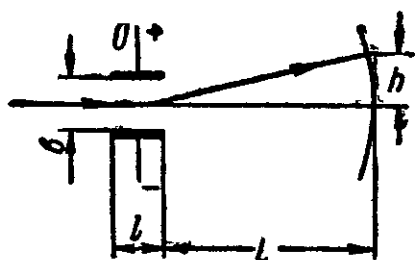


Рис. 15-8. Отклонение электронного луча под действием электрического поля.

Воздействуя на электронный луч электрическим или магнитным полем, можно вызвать его отклонение. В электронно-лучевых трубках для осциллографов обычно применяется только первый способ.

Допустим, что в электронно-лучевой трубке получен катодный луч, направление которого совпадает с осью трубки, о чем мы можем судить по резко очерченному светящемуся пятну в центре экрана. Если теперь приложить к отклоняющим пластинам (рис. 15-5 и 15-8) некоторое постоянное напряжение, то электрическое поле между пластинами вызовет отклонение электронного луча, и он встретится с экраном уже в другой точке, отстоящей от осевой линии на расстоянии

$$h = 0,5 \frac{U}{U_a} \cdot \frac{l}{b} \left(L + \frac{l}{2} \right) \approx 0,5 \frac{U}{U_a} \cdot \frac{l}{b} L,$$

где U — напряжение между отклоняющими пластинами;
 U_a — анодное напряжение.

Величина отклонения электронного луча (величина смещения светящегося пятна) на экране при изменении напряжения на отклоняющих пластинах на 1 называется чувствительностью трубки к напряжению:

$$S_U = \frac{h}{U} = 0,5 \frac{lL}{U_a b}.$$

Чувствительность трубок 0,2—0,5 мм/в.

Перемещение электронного луча под воздействием только одного электрического поля, созданного исследуемой величиной, будет происходить в одной плоскости, в нашем случае — в плоскости рисунка. Для того чтобы получить представление о характере изменения исследуемой величины в зависимости от времени для получения кривой исследуемой величины, необходимо вызвать перемещение электронного луча в плоскости, перпендикулярной к первой. Это перемещение вызывается воздействием на электронный луч электрическим полем вспомогательного напряжения, приложенного ко второй паре отклоняющих пластин P_2 .

Если к каждой из пар отклоняющих пластин одновременно будет приложено периодически изменяющееся напряжение, то электронный луч под действием двух полей будет перемещаться по экрану, описывая определенную замкнутую кривую (фигуру Лиссажу).

Форма фигуры Лиссажу зависит от формы кривых напряжений, приложенных к отклоняющим пластинам, а также от отношения их амплитуд, частот и сдвига фаз.

На основании полученной кривой можно получить кривую исследуемой величины.

Кривую исследуемой периодически изменяющейся величины обычно получают непосредственно в прямоугольных координатах на экране осциллографа следующим образом.

Для этого вспомогательное напряжение, приложенное к паре пластин P_2 осциллографа, должно изменяться по кривой, имеющей форму зуба пилы — пилообразное напряжение (рис. 15-9,б).

В начальный момент времени t_1 напряжение равно нулю. С этого момента оно начинает увеличиваться пропорционально времени, достигая к концу периода исследуемой величины t_2 своего амплитудного значения $U_{m\text{всп}}$. Под влиянием этого напряжения при отсутствии исследуемой величины (напряжения) электронный луч переместится на экране с постоянной скоростью по прямой линии из точки a_1 в точку a_2 (рис. 15-9,в).

Если одновременно на электронный луч будет действовать электрическое поле, созданное между парой отклоняющих пластин P_1 исследуемым напряжением u (рис. 15-9,а), то электронный луч под влиянием этого

поля, кроме того, будет отклоняться по экрану в вертикальном направлении на величину, пропорциональную мгновенному значению исследуемого напряжения. Таким образом, электронный луч под влиянием двух напряжений u и $u_{всп}$ в течение периода переместится на экране по кривой, изображенной на рис. 15-9, а.

По достижении вспомогательным напряжением его амплитудного значения (t_5) оно мгновенно падает до

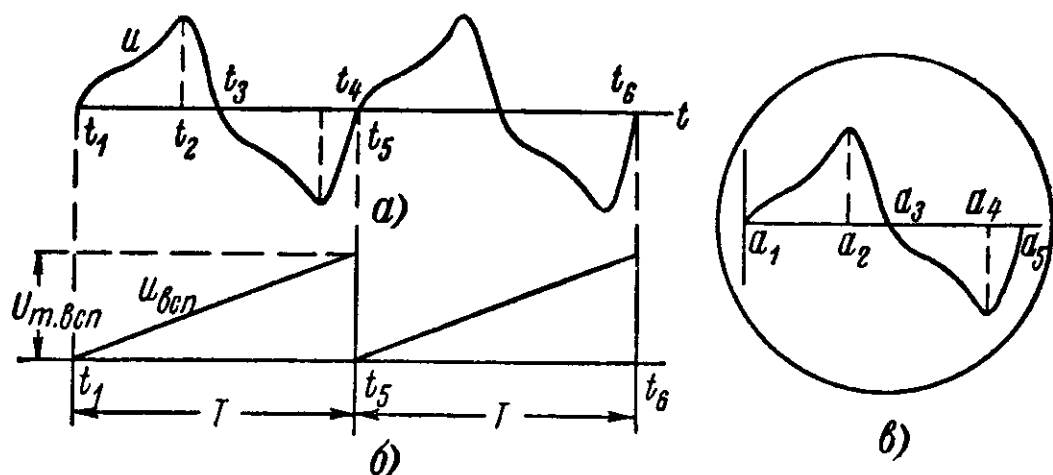


Рис. 15-9 Кривые исследуемого и вспомогательного напряжений.

нулевого значения, и в соответствии с этим электронный луч мгновенно из точки экрана a_5 переместится по прямой линии в точку экрана a_1 .

После этого вспомогательное напряжение снова начнет увеличиваться пропорционально времени, и электронный луч в течение второго, а затем и следующих периодов будет перемещаться на экране по той же самой кривой.

Благодаря световой инерции экрана на нем устойчиво будет держаться кривая исследуемой величины. Для того чтобы кривая устойчиво держалась на экране, необходимо, чтобы период пилообразного напряжения был в точности равен периоду исследуемого напряжения. Если период пилообразного напряжения будет в n раз больше периода исследуемого напряжения, то на экране будет n периодов исследуемой кривой.

Если кривая пилообразного напряжения будет отличаться от рассмотренной, в частности, если спадающая часть кривой будет не вертикальной, а наклонной, т. е., если изменение этого напряжения от амплитудного зна-

чения до нуля будет происходить не мгновенно, а в течение какой-то малой части периода, то это повлечет за собой выпадение из изображения кривой исследуемого напряжения соответствующей части ее. Так как обратное движение электронного луча из точки a_5 в точ-

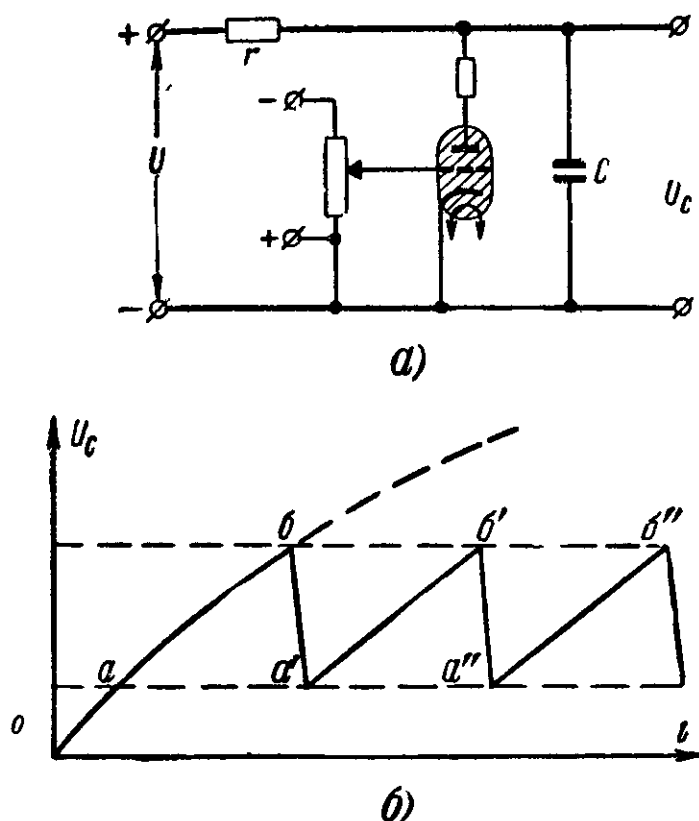


Рис 15-10. Схема тиратронного генератора пилообразного напряжения и его кривая.

ку a_1 происходит значительно быстрее, чем прямое движение его, то и кривая обратного хода луча будет менее яркой, чем основная кривая.

Для получения пилообразного напряжения применяются специальные ламповые (релаксационные) генераторы пилообразного напряжения.

На рис. 15-10 дана одна из возможных схем генератора пилообразного напряжения с тиратроном.

При включении постоянного напряжения U конденсатор C будет заряжаться через сопротивление r . Напряжение на нем будет изменяться по кривой $0ab$ (рис. 15-10,б). Увеличение этого напряжения будет происходить до тех пор, пока оно не достигнет величины напряжения зажигания тиратрона (точка b кривой $0ab$),

при котором сопротивление тиратрона резко падает. С этого момента конденсатор начнет быстро разряжаться через тиратрон, а напряжение на нем — быстро падать. Разряд конденсатора и уменьшение напряжения будут происходить до тех пор, пока последнее не достигнет напряжения гашения тиратрона (точка кривой a'). С этого момента конденсатор снова начнет заряжаться, а напряжение на нем — увеличиваться до напряжения зажигания тиратрона и т. д.

Таким образом, напряжение на выходе будет изменяться по кривой $aba'b'a''b''$ и т. д.

Величину напряжения зажигания тиратрона можно регулировать изменением потенциала сетки тиратрона.

Частоту генератора обычно регулируют изменением емкости конденсатора C и сопротивлением r .

Так как чувствительность каждой из пар отклоняющих пластин к напряжению мала, то как исследуемое напряжение, так и пилообразное напряжение предварительно должны быть усилены, а затем уже подведены к отклоняющим пластинам. Поэтому электронные осциллографы всегда имеют два усилителя. Усилитель для вертикально отклоняющих пластин P_1 обладает большим коэффициентом усиления по сравнению с усилителем для пластин P_2 . Обычно применяются электронные двухкаскадные усилители. Каждый из них дает возможность регулировать усиление.

К недостаткам электронного осциллографа нужно отнести наличие одного электронного луча в трубке и, следовательно, возможность одновременного исследования только одной величины, в то время как электромеханический осциллограф дает возможность одновременного исследования до нескольких десятков величин.

Однако, применяя специальный электронный коммутатор, например типа ЭК-1, позволяющий производить поочередно включение то одной, то второй исследуемой величины, воздействующей на электронный луч осциллографа, можно получить одновременно кривые двух периодически исследуемых величин.

Упрощенная схема электронного коммутатора ЭК-1 дана на рис. 15-11.

Исследуемые напряжения u_1 и u_2 через входные делители напряжения r_1 и r_2 подводятся к управляющим сеткам ламп L_1 и L_2 , на экранирующие сетки ко-

торых подается в противофазе напряжение прямоугольной формы, получаемое от симметричного мультивибратора приставки ЭК-1. В течение отрицательных полупериодов напряжения на экранирующей сетке лампа заперта.

Таким образом, каждая из ламп пропускает ток поочередно вследствие того, что экранирующие сетки ламп

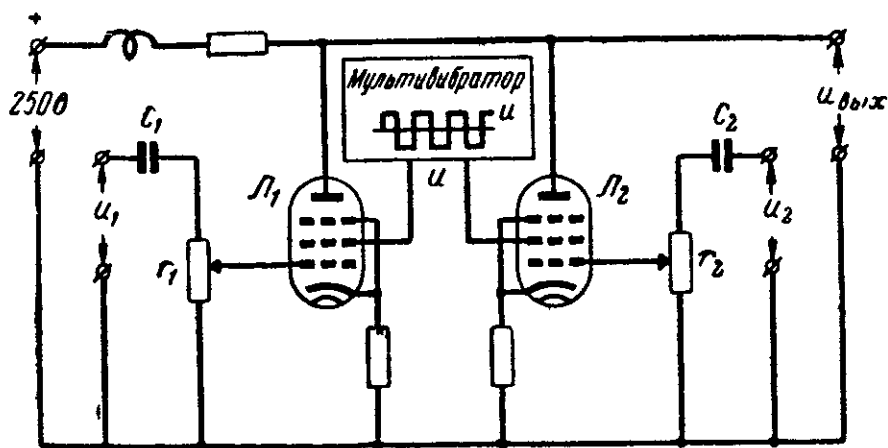


Рис. 15-11. Схема электроинного коммутатора ЭК-1.

получают импульсы напряжения противоположного знака.

Исследуемые напряжения поочередно, в периоды, когда соответствующая лампа не заперта, создают на выходе кривую напряжения, состоящую из участков, одна половина которых относится к одной исследуемой цепи, а вторая — ко второй цепи.

Так как выходные зажимы коммутатора соединены с входными зажимами вертикальных отклоняющих пластин осциллографа, то на экране трубки появляются по очереди обе кривые исследуемых напряжений, но вследствие световой инерции экрана глаз наблюдателя воспринимает две отдельные кривые.

Электронный осциллограф применяется не только для определения формы кривой напряжения, но и для измерения различных электрических величин: напряжения, тока, частоты, $\cos \phi$ и т. д. Он может быть применен также как нулевой индикатор в мостовых схемах переменного тока.

Кроме того, в сочетании с различными измерительными преобразователями он применяется для измерения ряда неэлектрических величин.

Переменное напряжение, подлежащее измерению, прикладывается к одной паре отклоняющих пластин осциллографа. На экране появляется линия, длина которой пропорциональна удвоенной амплитуде приложенного напряжения. Зная чувствительность или постоян-

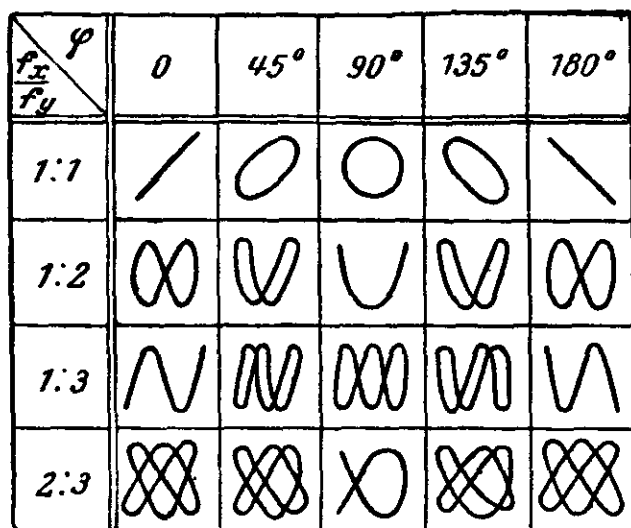


Рис 15-12 Фигуры Лиссажу при одинаковых амплитудах, но разных отношениях частот и различных углах сдвига фаз.

ную при данном режиме работы осциллографа, можно определить амплитуду приложенного напряжения.

Для измерения тока к одной паре отклоняющих пластин осциллографа прикладывается напряжение, равное падению напряжения, созданному измеряемым переменным током на известном активном сопротивлении. Определив аналогично предыдущему амплитуду измеряемого напряжения, зная сопротивление, легко определить и амплитуду тока.

Для измерения частоты методом сравнения к одной паре отклоняющих пластин осциллографа, например x_1 , подводится напряжение измеряемой частоты (f_x), а к другой паре пластин y — напряжение известной частоты f_y от измерительного генератора, частоту которого можно регулировать.

Если отрегулировать частоту измерительного генератора так, чтобы на экране осциллографа установилась одна из простейших фигур Лиссажу (рис. 15-12), то это укажет на то, что отношение измеряемой частоты f_x

к частоте генератора f_y равно отношению двух чисел, например $1/1$, $1/2$, $1/3$, $2/3$ и т. д. Для нахождения этих чисел проводят две линии: одну, xx , параллельно отклоняющим пластинам осциллографа x ; вторую, yy , параллельно отклоняющим пластинам y . Числа пересечений каждой из этих линий с фигурой Лиссажу и являются искомыми, определяющими отношение частот. Например, фигура, изображенная на рис. 15-13, пересекается линией xx 2 раза, а линией yy — 6 раз, следовательно,

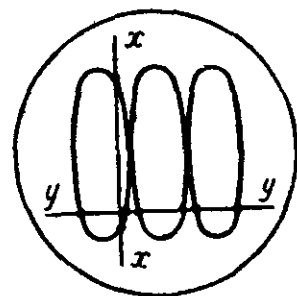


Рис. 15-13.
Определение
отношения
частот.

$\frac{f_x}{f_y} = \frac{2}{6} = \frac{1}{3}$, откуда $f_x = f_y \frac{1}{3}$; если $f_y = 1500$ гц, то

$$f_x = 1500 \frac{1}{3} = 500 \text{ гц.}$$

Отечественная, промышленность выпускает большое число разнообразных однолучевых электронных осциллографов, например ЭНО-1; ЭМО-2; ЭО-7; ЭО-53М и другие, а также и двухлучевых, например ДЭСО-1; ОК-17М; ОК-21 и др.

Глава шестнадцатая

МАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

16-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

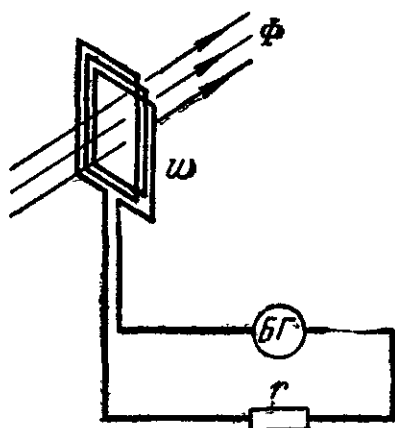
Явления электрические неразрывно связаны с явлениями магнитными. Свойства ферромагнитных материалов, широко применяемых в электротехнике, накладывают отпечаток на характеристики электрических машин, аппаратов, приборов, в которых они применяются. Поэтому электротехника, с одной стороны, не может обойтись без измерения магнитных величин (магнитного потока, магнитной индукции и т. д.), а с другой — без изучения свойств ферромагнитных материалов. При изучении свойств этих материалов нас интересуют, во-первых, кривая намагничивания и петля гистерезиса, во-вторых, величина потерь в стали при циклическом перемагничивании.

Весьма важным также является изучение свойств постоянных магнитов в связи с развитием ряда области промышленности, где постоянные магниты находят широкое применение.

16-2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОТОКА

а) Баллистический гальванометр

Для измерения магнитного потока баллистический гальванометр, измерительная катушка, охватывающая измеряемый магнитный поток, и сопротивление r соединяются последовательно (рис. 16-1).



Если быстро удалить катушку из магнитного поля или, наоборот, быстро ввести ее в поле, то изменение магнитного потока, пронизывающего катушку, вызовет появление в ней э. д. с.

$$e = -w_{н.к} \frac{d\Phi}{dt}.$$

Рис. 16-1. Схема соединения для измерения магнитного потока баллистическим гальванометром.

Под действием этой э. д. с. в цепи возникнет ток

$$i = \frac{e}{r}, \quad (16-1)$$

где $r = r_{н.к} + r_{б.г} + r_1$ — сопротивление в цепи гальванометр — измерительная катушка.

Подставив выражение e в формулу (16-1), получаем:

$$i = \frac{e}{r} = -w_{н.к} \frac{d\Phi}{r dt},$$

откуда

$$i dt = -\frac{w_{н.к}}{r} d\Phi.$$

Произведение $i dt$ обозначает электрический заряд, который возникает при изменении магнитного потока на величину $d\Phi$ за время dt .

Электрический заряд, который проходит по цепи за время τ при изменении магнитного потока от 0 до Φ ,

$$Q = \int_0^{\tau} i dt = - \frac{w_{н.к}}{r} \int_0^{\Phi} d\Phi = - \frac{w_{н.к}}{r} \Phi. \quad (16-2)$$

При изменении магнитного потока за время τ от Φ до нуля, заряд

$$Q = \frac{w_{н.к}}{r} \Phi.$$

Если измерительная катушка неподвижна, а магнитный поток, созданный током, изменяется от $+\Phi$ до $-\Phi$ вследствие переключения тока от $+I$ до $-I$, то заряд будет:

$$Q = 2 \frac{w_{н.к}}{r} \Phi. \quad (16-3)$$

Преобразуя формулу (16-2), получаем:

$$\Phi = \frac{r}{w_{н.к}} Q.$$

Заряд Q , проходя по рамке гальванометра, вызовет отброс его подвижной части. Если время протекания заряда значительно меньше периода колебания подвижной части гальванометра, то

$$Q = C_q a,$$

а магнитный поток

$$\Phi = \frac{r}{w_{н.к}} C_q a = \frac{C_\Phi}{w_{н.к}} a, \quad (16-4)$$

где $C_\Phi = r C_q$ — баллистическая постоянная, выраженная в единицах магнитного потока на деление шкалы ($вб/дел$).

Таким образом, зная баллистическую постоянную, по углу отклонения подвижной части гальванометра можно определить магнитный поток.

Баллистическая постоянная гальванометра зависит от сопротивления цепи гальванометра, так как с изменением этого сопротивления изменяется электромагнитное торможение. Поэтому при измерении магнитного

потока в формулу для его определения необходимо подставлять значение баллистической постоянной, соответствующее сопротивлению цепи гальванометра при измерении.

б) Определение баллистической постоянной гальванометра

Для определения баллистической постоянной можно воспользоваться схемой, показанной на рис. 16-2.

Установив реостатом ток I_1 при некотором значении сопротивления магазина r_m , перебросим ножи переключателя

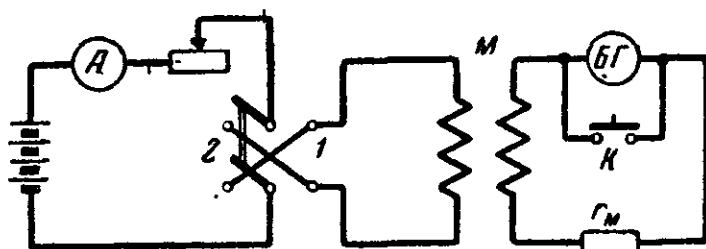


Рис. 16-2. Схема для определения баллистической постоянной гальванометра.

чателя из положения 1 в положение 2. При этом ток первичной цепи изменится с $+I_1$ до $-I_1$, а потокосцепление вторичной обмотки образцової катушки взаимной индуктивности изменится на

$$2\omega_2\Phi_2 = 2MI_1. \quad (16-5)$$

Это изменение потокосцепления вызовет протекание по цепи гальванометра заряда Q , а следовательно, отброс подвижной части гальванометра на угол α .

Так как

$$Q = \frac{2\omega_2\Phi_2}{r_2} = \frac{2MI_1}{r_2},$$

то баллистическая постоянная

$$C_\Phi = r_2 \frac{Q}{\alpha} = \frac{2MI_1}{\alpha}, \quad (16-6)$$

Определив баллистическую постоянную при различных значениях сопротивления вторичной цепи r_2 , строят кривую зависимости баллистической постоянной от сопротивления этой цепи, т. е. $C_\Phi = f(r_2)$.

в) Флюксметр (веберметр)

Флюксметр представляет собой разновидность гальванометра магнитоэлектрической системы с ничтожно малым противодействующим моментом.

На рис. 16-3,а дана схема флюксметра типа М-19, а на рис. 16-3,б — его внешний вид.

В воздушном зазоре между полюсами постоянного магнита и стальным цилиндром на двух полюсах рас-

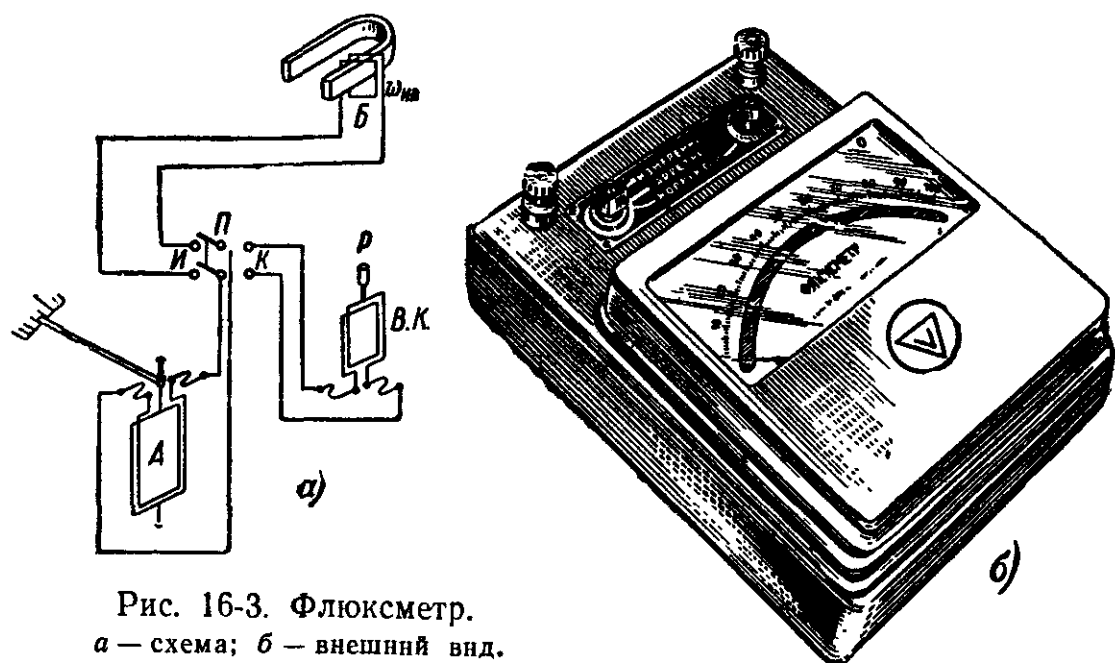


Рис. 16-3. Флюксметр.
а — схема; б — внешний вид.

положена подвижная рамка *А* флюксметра. На одной из полуосей укреплена указательная стрелка.

Принцип работы флюксметра основан на свойстве магнитного потока замкнутого контура сохранять неизменной свою величину.

Если к рамке флюксметра присоединить надетую на постоянный магнит измерительную катушку *Б* (переключатель *П* — в положении *И*), а затем быстро сдёрнуть ее с магнита, то в замкнутом контуре «измерительная катушка — рамка флюксметра» произойдет уменьшение потокосцепления $\psi_{и.к.Ф}$. Согласно сказанному выше это уменьшение магнитного потока, сцепленного с измерительной катушкой (контуром), вызовет поворот рамки флюксметра на угол α , при котором произойдет увеличение потокосцепления рамки флюксметра, компенсирующее уменьшение потокосцепления измерительной катушки.

Так как магнитное поле, в котором находится рамка, радиально-равномерное, то изменение потоко-сцепления рамки будет:

$$\omega_p \Phi_p = BS \omega_p \alpha,$$

следовательно,

$$\omega_{и.к} \Phi = BS \omega_p \alpha,$$

откуда

$$\Phi = \frac{BS \omega_p}{\omega_{и.к}} \alpha = \frac{C}{\omega_{и.к}} \alpha, \quad (16-7)$$

где C — постоянная флюксметра, равная 10 000 мкс/дел;
 α — число делений шкалы, определяющее угол поворота подвижной части флюксметра.

Пример 16-1 Если при сбрасывании измерительной катушки с постоянного магнита подвижная часть флюксметра отклонилась на $\alpha = 35$ дел, а измерительная катушка имеет число витков $\omega_{и.к} = 10$, то магнитный поток, пронизывающий измерительную катушку в том месте, где она была расположена до сбрасывания, будет.

$$\Phi = \frac{C \alpha}{\omega_{и.к}} 10^{-8} = \frac{10\,000}{10} 35 \cdot 10^{-2} = 35 \cdot 10^{-5} \text{ вб.}$$

Так как противодействующий момент флюксметра ничтожно мал (рамка имеет безмоментные подводы), то для установки стрелки флюксметра в нулевое положение он снабжен вспомогательным магнитом, между полюсами которого расположена вспомогательная рамка. Если переключатель Π поставить в положение K (корректор) и при помощи рукоятки P поворачивать вспомогательную катушку, то изменение потоко-сцепления вспомогательной катушки вызовет поворот подвижной части флюксметра, компенсирующий изменение потоко-сцепления вспомогательной катушки, что и позволяет установить стрелку прибора перед измерением на нулевое деление шкалы.

16-3. ИЗМЕРЕНИЕ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ, НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ И МАГНИТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

а) Баллистический гальванометр

Измерение магнитной индукции. В § 16-2 а, мы рассмотрели применение баллистического гальванометра совместно с измерительной катушкой для определения магнитного потока.

Тот же процесс измерения можно использовать и для нахождения магнитной индукции.

Так как при однородном поле и витках измерительной катушки, расположенных в плоскости, перпендикулярной к вектору магнитной индукции,

$$B = \frac{\Phi}{S},$$

то, заменив Φ его выражением из формулы (16-4), получим:

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{C_{\Phi}}{S w_{\text{и.к}}} \alpha. \quad (16-8)$$

Таким образом, по баллистическому отбросу подвижной части гальванометра α можно найти значение магнитной индукции.

Измерение напряженности магнитного поля. Определение напряженности постоянного магнитного поля можно произвести, пользуясь измерительной катушкой, присоединенной к баллистическому гальванометру (флюксметру).

Измерительную катушку помещают в испытуемое магнитное поле.

При выключении или включении тока, возбуждающего испытуемое поле, будет иметь место баллистический отброс. Согласно (16-4)

$$\Psi = \Phi w_{\text{и.к}} = C_{\Phi} \alpha. \quad (16-9)$$

При одинаковой напряженности поля по всему сечению измерительной катушки можно написать:

$$\Psi = \mu_0 H S w_{\text{и.к}},$$

откуда напряженность поля

$$H = \frac{\Psi}{\mu_0 S w_{\text{и.к}}},$$

где μ_0 — абсолютная магнитная проницаемость воздуха, равная магнитной постоянной.

Заменив Ψ его выражением из формулы (16-9), получим:

$$H = \frac{C_{\Phi}}{\mu_0 S w_{\text{и.к}}} \alpha = \frac{C_{\Phi}}{k} \alpha. \quad (16-10)$$

Для определения напряженности магнитного поля необходимо знать баллистическую постоянную C_Φ и постоянную катушки k .

Постоянная $k = \mu_0 S \omega_{и.к}$ определяется предварительно. Для этого катушку помещают в магнитное поле, напряженность которого H можно определить с помощью расчета, например поле соленоида. Замкнув катушку на баллистический гальванометр, замечают баллистический отброс при включении или выключении тока соленоида.

Постоянная катушки согласно (16-10) определяется по формуле

$$k = \frac{C_\Phi}{H} \alpha. \quad (16-11)$$

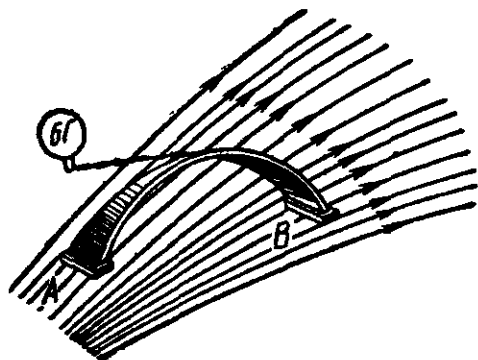


Рис. 16-4. Схема для измерения магнитного напряжения при помощи потенциометра (магнитного пояса).

При испытании образцов ферромагнитных материалов напряженность поля в образце можно определить по напряженности поля на поверхности образца. Это основывается на известном положении, согласно которому тангенциальные составляющие напряженности магнитного поля по обе стороны поверхности раздела двух сред имеют одинаковые значения. Так как магнитное поле при удалении от поверхности образца убывает, то измерительная катушка должна быть плоской и тонкой толщиной порядка 1 мм.

Катушка изготавливается из тонкой изолированной проволоки, намотанной обычно в два или четыре слоя на очень тонкую пластинку из изоляционного материала.

Катушка после определения постоянной накладывается на поверхность образца так, чтобы ось ее совпадала с направлением поля. После этого она присоединяется к баллистическому гальванометру.

При включении или выключении тока, возбуждающего измеряемое магнитное поле, отсчитывается баллистический отброс, и по формуле (16-10) находится напряженность поля в образце.

Измерение магнитного напряжения. Для измерения магнитного напряжения применяется потенциометр или

иначе магнитный пояс. Он представляет собой длинную, порядка 1 м, гибкую плоскую катушку, обмотка которой состоит из четного числа слоев, например двух, намотанных в одну сторону с равномерной плотностью $\omega_0 = \omega/l$ на сердечник из неферромагнитного материала. Концы обмотки выводятся к зажимам, укрепленным на середине пояса. К этим зажимам, скрученным шнуром, присоединяется баллистический гальванометр (рис. 16-4).

Если нужно, например, измерить н. с. между точками поля AB , то концы пояса помещают в эти точки.

При включении или выключении тока, возбуждающего измеряемое поле, изменится магнитный поток, сцепленный с поясом, и наблюдается баллистический отброс.

Согласно (16-4)

$$C_{\Phi} \alpha = \Psi,$$

где $\Psi = \Phi \omega$ — потокосцепление с поясом.

Потокосцепление с элементом пояса длиной dl

$$d\Psi = \mu_0 H_l S \omega_0 dl,$$

где μ_0 — магнитная постоянная;

H_l — тангенциальная составляющая напряженности поля;

S — площадь сечения пояса.

Потокосцепление всего пояса

$$\Psi = \int_B^A d\Psi = \mu_0 S \omega_0 \int_B^A H_l dl \quad (16-12)$$

или, так как $\int_B^A H_l dl = U_M$, то

$$\Psi = \mu_0 S \omega_0 U_M,$$

откуда

$$U_M = \frac{\Psi}{\mu_0 S \omega_0} = \frac{C_{\Phi}}{k} \alpha = C_{\Pi} \alpha, \quad (16-13)$$

где $C_{\Pi} = \frac{C_{\Phi}}{k}$ — постоянная цепи пояса — гальванометр.

Постоянная пояса определяется опытным путем.

Для определения постоянной пояса пользуются вспомогательной катушкой (рис. 16-5), имеющей число витков ω_1 . Катушка охватывается поясом, концы которого прижимаются друг к другу.

При включении или выключении тока I_1 в катушке

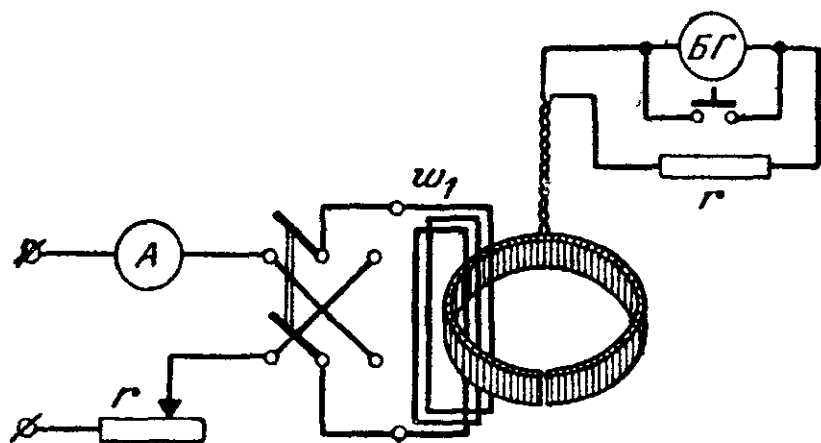


Рис. 16-5. Схема для определения постоянной магнитного пояса.

изменяется магнитный поток, сцепленный с поясом, и наблюдается баллистический отброс.

Согласно (16-13) $U_m = C_{\Pi} \alpha$.

Но в этом случае интеграл по замкнутому контуру $\int H_i dl = U_m$ представляет собой полный ток вспомогательной катушки $I_1 \omega_1$. Отсюда и определяется постоянная пояса

$$C_{\Pi} = \frac{U_m}{\alpha} = \frac{I_1 \omega_1}{\alpha}. \quad (16-14)$$

б) Измерение напряженности постоянного магнитного поля с использованием ядерного магнитного резонанса

Если на ядра какого-либо вещества, расположенного в постоянном магнитном поле, воздействовать еще и переменным магнитным полем высокой частоты, то при определенном соотношении между напряженностью постоянного поля H и частотой переменного поля f наступит резонансное поглощение ядрами вещества энергии поля высокой частоты.

Согласно представлениям квантовой механики, например, ядро водорода — протон может иметь две

ориентации магнитного момента во внешнем магнитном поле — по полю и против поля.

Для изменения ориентации магнитного момента протона необходим квант энергии hf , где h — универсальная постоянная (постоянная Планка); f — частота.

Разность энергий, соответствующая таким двум состояниям протона, составляет $2m_p H$, где m_p — магнитный момент протона.

Таким образом,

$$hf = 2m_p H,$$

откуда

$$\omega = 2\pi f = \frac{4\pi}{h} m_p H = \gamma_p H$$

или

$$H = \frac{2\pi f}{\gamma_p}, \quad (16-15)$$

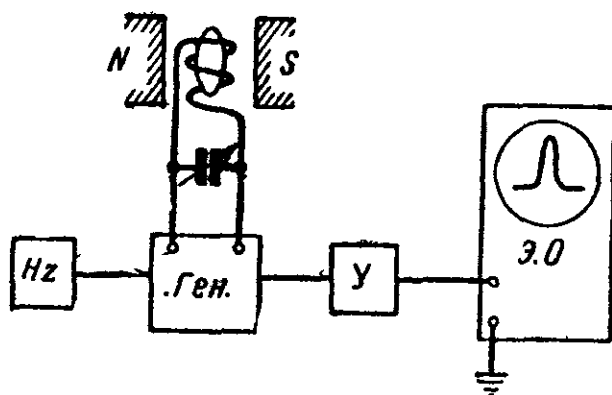


Рис. 16-6. Блок-схема для определения напряженности магнитного поля с использованием ядерного магнитного резонанса.

где γ_p — гидромагнитное отношение ядра, т. е. отношение магнитного момента ядра к его механическому моменту.

Гидромагнитные отношения ядер ряда веществ известны с точностью до тысячных долей процента.

Измерение напряженности постоянного магнитного поля сводится к измерению частоты, при которой наступает явление магнитного ядерного резонанса.

Блок-схема установки для определения напряженности постоянного магнитного поля дана на рис. 16-6.

В измеряемом магнитном поле помещается катушка, внутри которой расположена ампула, содержащая протоны, например водный раствор $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$. Ось катушки расположена перпендикулярно направлению постоянного магнитного поля. Катушка вместе с конденсатором образует колебательный контур, присоединенный к высокочастотному генератору.

При изменении частоты генератора по резкому изменению амплитуды резонансной кривой на экране электронного осциллографа можно определить момент резонанса. Резонансная частота определяется с помощью частотомера или волномера.

Этот метод применим для измерений напряженности магнитного поля от 800 до $16 \cdot 10^5$ а/м. Точность его $\pm 0,01\%$.

На рассмотренном принципе работают приборы типа ИМИ-2, выпускаемые отечественной промышленностью.

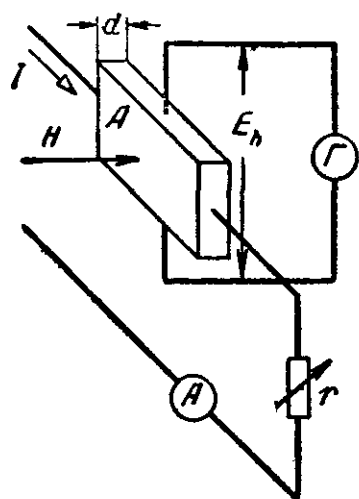


Рис. 16-7. Принцип определения напряженности магнитного поля с применением эффекта Холла.

в) Определение напряженности магнитного поля с использованием эффекта Холла

Пластинку A (рис. 16-7) из полупроводникового материала (германий, сурьмистый индий и др.) поместим в постоянное магнитное поле перпендикулярно вектору напряженности поля H .

Если в пластинке будет проходить ток, направление которого перпендикулярно направлению напряженности поля, то в пластинке возникнет э. д. с., направление которой перпендикулярно как вектору напряженности поля, так и направлению тока.

Величина этой э. д. с., называемой э. д. с. Холла,

$$e_h = \frac{R_h}{d} iH,$$

откуда напряженность поля

$$H = e_h \frac{d}{R_h i}. \quad (16-16)$$

Здесь R_h — постоянная Холла, зависящая от материала пластинки, d — толщина пластинки.

Таким образом, измерив величину э. д. с. Холла, можно определить напряженность магнитного поля.

Зонды Холла применяются также для измерения больших токов и других величин.

Эффект Холла использован, в частности, в приборах типа ИМИ-3, выпускаемых отечественной промышленностью для измерения магнитной индукции.

16-4. ПОЛУЧЕНИЕ КРИВОЙ НАМАГНИЧИВАНИЯ И ПЕТЛИ ГИСТЕРЕЗИСНОГО ЦИКЛА БАЛЛИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

На рис. 16-8 дана основная кривая намагничивания и симметричная петля гистерезисного цикла — кривые, характеризующие основные свойства ферромагнитного материала.

Для построения этих кривых необходимо определить при различных значениях напряженности магнитного поля соответствующие им значения магнитной индукции.

Напряженность поля в образце определяется или расчетным путем по формуле

$$H = \frac{I_1 \omega_1}{l}, \quad (16-17)$$

или при помощи измерительной катушки, накладываемой на поверхность образца и баллистического гальванометра (см. § 16-3, а).

Образец исследуемого ферромагнитного материала (стали) может иметь кольцевую или стержневую форму. Кольцевой образец имеет обычно квадратное сечение, стержневой — квадратное или круглое сечение. Если испытывается листовая сталь, то образец набирается или из листов кольцевой формы, или из листовых полос, в том и другом случае сечение образца квадратное.

Если образец имеет кольцевую форму, то на него равномерно накладываются измерительная обмотка ω_2 для подключения баллистического гальванометра, а поверх нее — намагничивающая обмотка ω_1 .

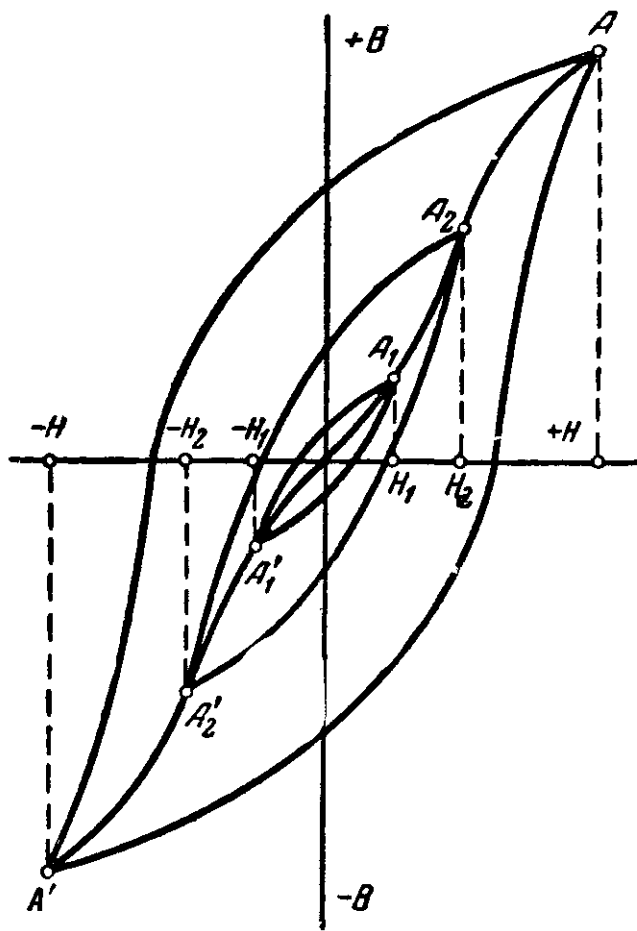


Рис. 16-8. Основная кривая намагничивания и петля гистерезисного цикла.

Относительная сложность изготовления кольцевых образцов и намотывания обмоток вынуждают пользоваться стержневыми образцами.

Концы стержневого образца необходимо замкнуть магнитно накоротко, т. е. замкнуть их магнитопроводом, который вместе с образцом составит замкнутую магнитную цепь с сопротивлением, практически равным магнитному сопротивлению образца. Такой магнитопровод

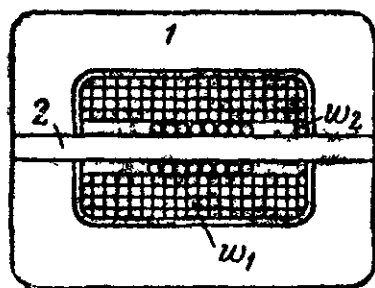


Рис. 16-9. Схема устройства пермеаметра.

с укрепленными на нем намагничивающей w_1 и измерительной w_2 обмотками называется пермеаметром.

На рис. 16-9 показана схема устройства одного из таких пермеаметров. Он представляет собой массивный стальной магнитопровод 1 прямоугольной (или круглой) формы. Через боковые отверстия вводится и укрепляется при помощи специальных вкладышей испытуемый стержневой образец 2. Магнитопровод имеет сечение, в десятки раз большее сечения образца, кроме того, он изготавливается из стали с большой магнитной проницаемостью, вследствие чего сопротивление магнитопровода несоизмеримо меньше сопротивления образца.

Воздушный зазор между магнитопроводом и образцом увеличивает магнитное сопротивление цепи и является источником погрешностей. Для уменьшения этих погрешностей пользуются поправочными кривыми.

На рис. 16-10 дана схема соединения для получения основной кривой намагничивания и петли гистерезисного цикла.

Перед получением основной кривой намагничивания необходимо определить баллистическую постоянную гальванометра. Для этого отключают намагничивающую обмотку w_1 , поставив ножи переключателя Π_1 в положение 1, кнопку K_1 замыкают и получают, таким образом, цепь, изображенную на рис. 16-2. Процесс определения баллистической постоянной гальванометра изложен в § 16-2,б.

Перед испытанием образец должен быть размагничен, для чего он подвергается воздействию изменяюще-

гося по направлению и уменьшающегося по величине магнитного поля.

Для этого кнопки K и K_1 замыкаются (рис. 16-10), ножи переключателя Π_1 ставятся в положение 2, а ножи переключателя Π_2 — в произвольное положение 1 или 2. Установив реостатом r_2 намагничивающий ток, соответствующий напряженности поля порядка 40 а/см, произ-

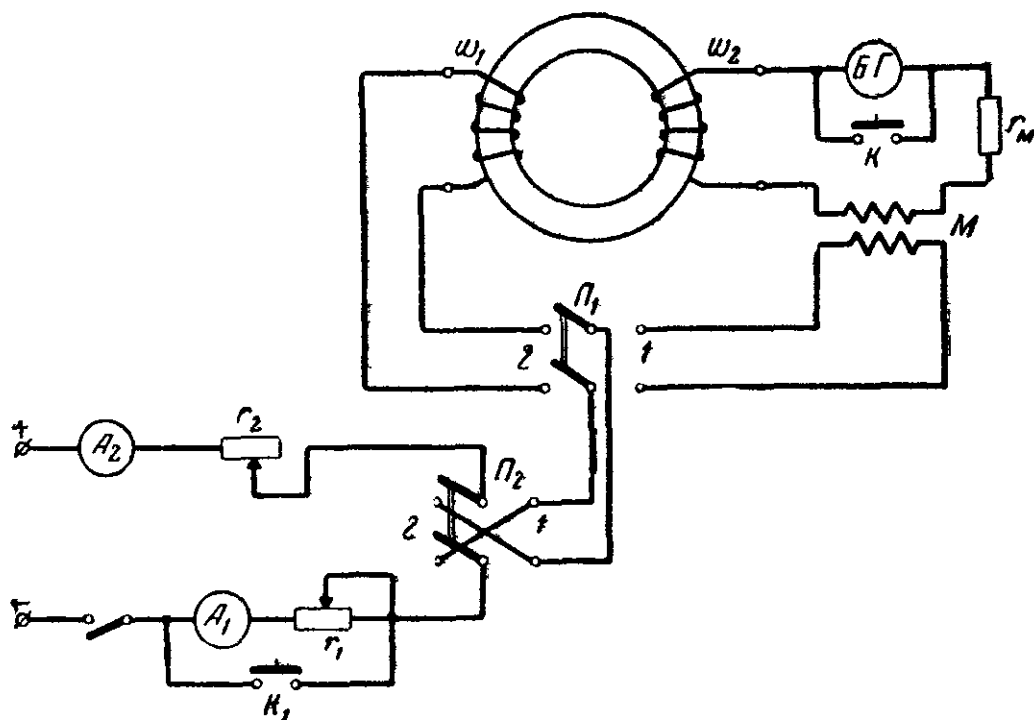


Рис. 16-10. Схема соединения для получения основной кривой намагничивания и петли гистерезисного цикла.

водят несколько (примерно 10) переключений направления тока; затем несколько уменьшают ток и снова делают ряд переключений направлений тока, и так далее, уменьшая ток сначала до возможного минимума, а затем и до нуля.

Получение основной кривой намагничивания. Так как под основной кривой намагничивания понимают кривую, представляющую геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель, то для ее получения следует предварительно выбрать напряженности поля, при которых будут получены гистерезисные петли. Задав-шись напряженностями поля, определяют соответствующие им намагничивающие токи по формуле (16-17).

При получении основной кривой намагничивания кнопки K и K_1 замыкаются, ножи переключателя Π_1 ставятся в положение 2, а Π_2 — в положение 1.

Для получения первой петли с наименьшим значением H_1 и B_{m1} , вершина которой будет первой точкой A_1 искомой кривой (рис. 16-8), устанавливают при помощи реостата r_2 и амперметра A_2 вычисленный намагничивающий ток. Сделав переключателем Π_2 ряд переключений (порядка 10), поставим ножи переключателя в положение 1. Такое многократное переключение намагничивающего тока приводит образец в состояние, определяемое симметричной гистерезисной петлей, и носит название магнитной подготовки образца. Таким образом, в нашем случае магнитное состояние образца будет характеризоваться точкой A_1 , являющейся вершиной первой симметричной гистерезисной петли.

Разомкнув кнопку K и убедившись в том, что указатель гальванометра стоит на нуле, перебрасывают ножи переключателя из положения 1 в положение 2, отсчитывают при этом баллистический отброс гальванометра и замыкают кнопку K .

При этом переключении напряженность поля изменилась с $+H_1$ на $-H_1$, а магнитная индукция с $+B_{m1}$ (точка A_1), на $-B_{m1}$ (точка A'_1), т. е. магнитная индукция изменилась на $2B_{m1}$.

Величина магнитной индукции, соответствующая вершине первой гистерезисной петли, определится по формуле (16-8)

$$B_{m1} = \frac{C_{\Phi}}{2S_w} \alpha_1.$$

Для получения второй, а затем и следующих точек основной кривой намагничивания поступают аналогичным образом, т. е. устанавливают намагничивающий ток, выполнив магнитную подготовку, ставят ножи переключателя Π_2 в положение 1. Разомкнув кнопку K , перебрасывают ножи переключателя Π_2 из положения 1 в положение 2, отсчитывают баллистический отброс, замыкают кнопку K и определяют вершину второй гистерезисной петли (точка A_2).

Таким образом находятся все точки основной кривой намагничивания, включая и точку A , соответствующую наибольшей напряженности поля при данном испытании.

Получение петли гистерезисного цикла. Для получения точек петли гистерезиса находят разности между максимальной магнитной индукцией B_m , соответствующей

щей максимальной напряженности поля H_m при данном испытании, и магнитной индукцией, соответствующей меньшим напряжениям поля.

Задавшись напряжениями магнитного поля, для которых будет определяться магнитная индукция, найдем, как и раньше, соответствующие им намагничивающие токи по формуле (16-17).

Определение точек гистерезисной петли, расположенных на нисходящей части петли в первом квадранте (рис. 16-11), производится следующим образом.

Ножи переключателя Π_1 ставятся в положение 2, переключателя Π_2 — в положение 1. Кнопки K и K_1 замкнуты.

Размыкая кнопку K_1 , устанавливают релостатом r_1 намагничивающий ток I_1 , соответствующий напряженности поля H_1 . Замкнув кнопку K_1 переключателем Π_2 , выполняют магнитную подготовку ($\pm I_m \pm H_m \pm B_m$), после которой ножи переключателя Π_2 ставят в положение 1. Разомкнув кнопку K и убедившись в том, что указатель гальванометра стоит на нуле шкалы, разомкнем кнопку K_1 , и, отметив баллистический отброс гальванометра, замкнем кнопку K .

При размыкании кнопки K_1 ток уменьшился с $+I_m$ до I_1 , напряженность поля с $+H_m$ до H_1 и магнитная индукция с $+B_m$ до B_1 (рис. 16-11).

Таким образом, по баллистическому отбросу определяется изменение магнитной индукции

$$\Delta B_1 = B_m - B_1 = \frac{C_\Phi}{S_w} a_1,$$

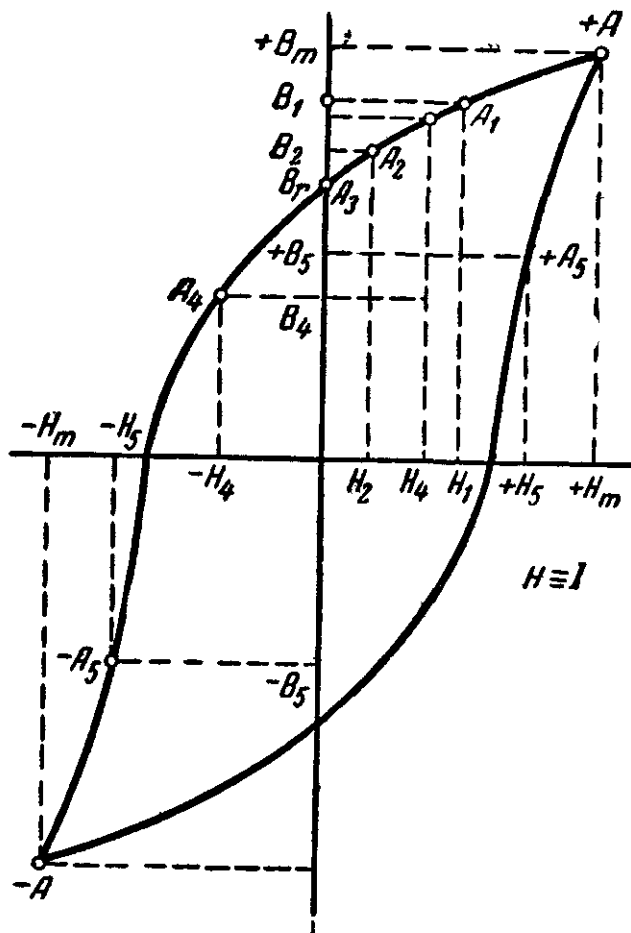


Рис. 16-11. Петля гистерезиса.

откуда и находится искомое значение магнитной индукции

$$B_1 = B_m - \Delta B_1 = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_1. \quad (16-18)$$

Аналогично первой точке A_1 (H_1 и B_1) на рис. 16-11 находятся и другие точки этой кривой, расположенные в первом квадранте.

При нахождении точки A_3 (рис. 16-11), соответствующей остаточной индукции B_r , после магнитной подготовки и установки ножей переключателя Π_2 в положение 1 размыкают кнопку K и, размыкая цепь намагничивающего тока ножами переключателя Π_2 , отмечают баллистический отброс гальванометра и находят остаточную индукцию по формуле

$$B_r = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_r. \quad (16-19)$$

Определение точек гистерезисной петли, расположенных во втором и третьем квадрантах (рис. 16-11), производится так же, как и определение точек, расположенных в первом квадранте, с той лишь разницей, что вслед за магнитной подготовкой и размыканием кнопки K_1 тотчас же производится переключение ножей переключателя Π_2 из положения 1 в положение 2. При этом намагничивающий ток изменится, например, от $+I_m$ до $+I_4$ и от $+I_4$ до $-I_4$, напряженность поля изменится от $+H_m$ до $+H_4$ и от $+H_4$ до $-H_4$ (рис. 16-11). Соответственно этому магнитная индукция изменится от $+B_m$ до $+B'_4$ и от $+B'_4$ до $+B_4$ (точка A_4 на рис. 16-11).

Таким образом, изменение магнитной индукции, определяемое по баллистическому отбросу гальванометра, будет иметь вид:

$$\Delta B = B_m - B_4 = \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_4,$$

откуда

$$B_4 = B_m - \frac{C_\Phi}{S_w} \alpha_4.$$

Последняя, определяемая экспериментально, точка $-A$ (рис. 16-11) находится по баллистическому отбросу, наблюдаемому при переключении ножей пере-

ключателя Π_2 из положения 1 в положение 2, которое производится после магнитной подготовки.

При этом изменение магнитной индукции будет:

$$\Delta B = B_m - (-B_m) = 2B_m = \frac{C_\Phi}{S\omega} \alpha,$$

откуда

$$B_m = \frac{C_\Phi}{2S\omega} \alpha. \quad (16-20)$$

Вторая половина гистерезисной петли строится обычно, исходя из условий симметрии ее с первой половиной петли.

16-5. ФЕРРОМЕТР

Магнитные характеристики ферромагнитных материалов, работающих в цепях переменного тока, вследствие влияния вихревых токов могут отличаться от характеристик тех же материалов, снятых на постоянном токе.

Поэтому представляет интерес получение характеристик ферромагнитных материалов при переменном токе.

Феррометр дает возможность получения основной кривой намагничивания стали и определения потерь в ней при переменном токе.

Он состоит из измерительного механизма I магнитоэлектрической системы, вибрационного выпрямителя и фазорегулятора (рис. 16-12 и 16-14).

Выпрямитель (рис. 16-12) состоит из постоянного магнита M , электромагнита E и якоря-вибратора A .

Обмотка электромагнита питается током возбуждения i_v от ротора фазорегулятора. Фаза этого тока может изменяться поворотом ротора фазорегулятора. В течение одного полупериода тока возбуждения якорь замыкает измерительную цепь в точке B ; в течение второго полупериода измерительная цепь остается разомкнутой. Если ток возбуждения совпадает по фазе с измеряемым током i , то в течение каждого периода через

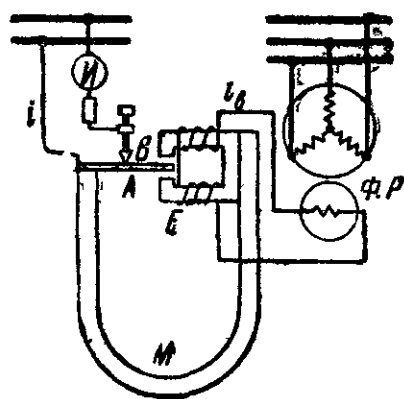


Рис. 16-12. Схема феррометра.

измерительный механизм будет проходить вся положительная полуволна тока (рис. 16-13,а), и стрелка измерительного механизма отклонится на угол, пропорциональный среднему за половину периода значению измеряемого тока (напряжения).

Если ток возбуждения не совпадает по фазе с измеряемым током, то через измерительный механизм в те-

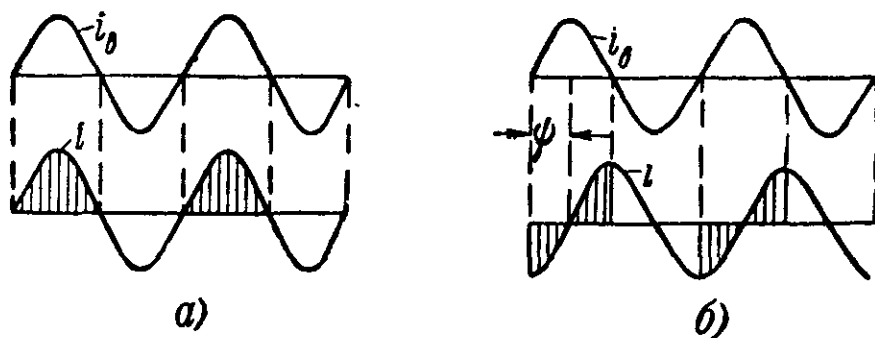


Рис. 16-13. Кривые токов в феррометре.

чение каждого периода будет проходить часть положительной и часть отрицательной полуволн тока, и стрелка прибора отклонится на угол, пропорциональный произведению среднего значения измеряемого тока (напряжения) и косинуса угла сдвига ψ между токами i_0 и i , т. е.

$$\alpha = k I_{\text{ср}} \cos \psi.$$

Так, например, при $\psi = 90^\circ$ отклонение стрелки прибора будет равно нулю (рис. 16-13,б), так как

$$\alpha = k I_{\text{ср}} \cos \psi = k I_{\text{ср}} 0 = 0.$$

Это и понятно, так как в этом случае через измерительный механизм в течение каждого периода будет проходить половина положительной и половина отрицательной полуволн тока и, следовательно, среднее значение тока измерительного механизма будет равно нулю.

Прибор градуируется на действующие значения напряжения для синусоидальной формы кривой.

На рис. 16-14 дана принципиальная схема соединения для испытания стали. Образец стали имеет форму кольца массой около 50 г. На образец накладываются две обмотки: намагничивающая w_1 и измерительная w_2 .

Намагничивающая обмотка питается через трансформатор от одной цепи с фазорегулятором.

Испытание ведется следующим образом. Измерительный механизм при помощи двухполюсного переключателя подключают к обмотке ω_2 . Ротор фазорегулятора поворачивают до тех пор, пока измерительный механизм не даст наибольшее показание, что соответствует совпадению по фазам тока возбуждения i_b и тока i в цепи измерительной обмотки ω_2 . Это показание прибора даст величину напряжения U_2 на зажимах обмотки ω_2 , которое может быть выражено известным уравнением

$$U_2 = 4,44f\omega_2 B_m S \cdot 10^8.$$

Отсюда можно определить значение магнитной индукции в образце

$$B_m = U_2 \frac{10^4}{4,44f\omega_2 S}, \quad (16-21)$$

где U_2 — показание прибора, в;

B_m — максимальное значение индукции, вб/м²;

S — сечение образца, см².

Определив напряжение U_2 , не изменяя положения ротора фазорегулятора, при помощи переключателя включим прибор на зажимы сопротивления r_1 . Напряжение U_1 на зажимах этого безреактивного сопротивления пропорционально току I намагничивающей обмотки ω_1 . В этом случае показания прибора дадут значение активной слагающей этого напряжения $U_{1a} = r_1 I \cos \varphi$, так как между током возбуждения i_b (совпадающим по фазе с напряжением U_2) и током прибора (совпадающим по фазе с током в сопротивлении r_1) имеется угол сдвига φ . Зная величину активного сопротивления r_1 , можно определить активную слагающую намагничивающего тока:

$$I_a = I \cos \varphi = \frac{U_{1a}}{r_1}.$$

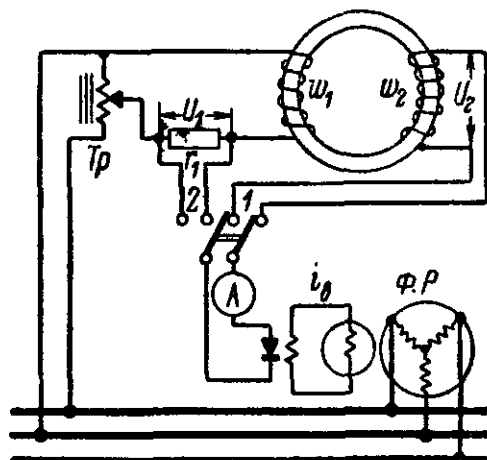


Рис. 16-14. Принципиальная схема соединения для испытания стали при помощи феррометра.

Переключив прибор на обмотку ω_2 , поворотом ротора фазорегулятора добьемся нулевого показания прибора, что будет соответствовать изменению фазы тока возбуждения на 90° . Теперь, переключив прибор на сопротивление r_1 , измерим реактивную слагающую напряжения $U_{1r}=r_1 I \sin \varphi$, откуда реактивная слагающая намагничивающего тока может быть записана:

$$I_r = I \cdot \sin \varphi = \frac{U_{r1}}{r_1}.$$

Напряженность магнитного поля, созданного обмоткой ω_1 , может быть определена по формуле

$$H_m = \frac{\sqrt{2} I \sin \varphi \cdot \omega_1}{l}, \quad (16-22)$$

откуда магнитная проницаемость

$$\mu = \frac{B_m}{H_m} = \frac{B_m l}{\sqrt{2} \sin \varphi \cdot \omega_1}, \quad (16-23)$$

где l — длина осевой линии кольцевого образца.

Мощность потерь в образце на гистерезис и вихревые токи

$$P_{c0} = U_2 I \cos \varphi \frac{\omega_1}{\omega_2} \cdot \frac{1}{G}, \quad (16-24)$$

где P_{c0} — мощность потерь, отнесенная к 1 кг стали;
 G — вес образца, кг.

Производя ряд аналогичных измерений при различных значениях напряжения на зажимах намагничивающей обмотки, можно для различных значений напряженности поля H определить соответствующие значения B и μ , что дает возможность построить кривые

$$B_m = f(H) \text{ и } \mu = f(H).$$

Кроме того, определив P_{c0} при различных значениях B_m , можно построить кривую

$$P_{c0} = f(B_m).$$

Феррометры типа У-542, выпускаемые отечественной промышленностью, имеют номинальную частоту 50 гц.

16-6. ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА

Одна из возможных схем получения магнитных характеристик на переменном токе с применением электронного осциллографа дана на рис. 16-15.

На кольцевой образец наложены две обмотки, намагничивающая w_1 и измерительная w_2 .

Намагничивающая обмотка и последовательно со-

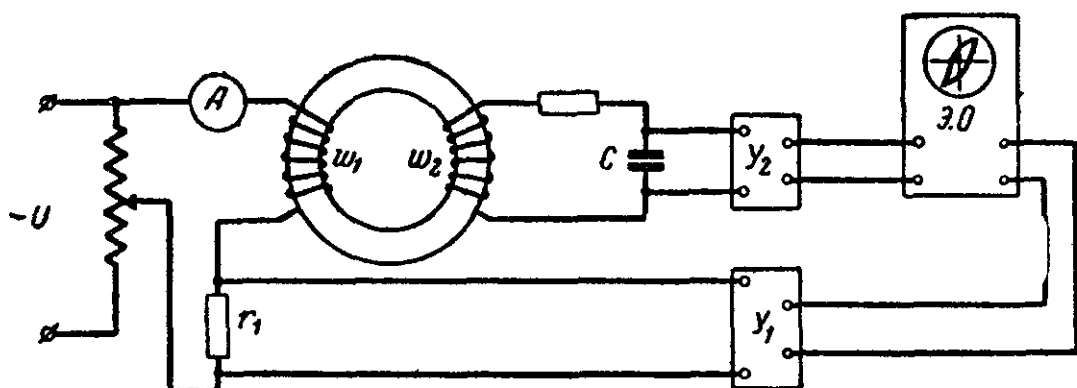


Рис. 16-15. Схема получения магнитных характеристик с применением электронного осциллографа.

единенное с ней безреактивное сопротивление r_1 через автотрансформатор присоединены к сети переменного тока.

Напряжение $u_1 = i_1 r_1$ на зажимах сопротивления r_1 , пропорционально намагничивающему току i_1 , а следовательно и напряженности поля в образце.

Измерительная обмотка замкнута на последовательно соединенные конденсатор C и большое безреактивное сопротивление r_2 .

Наведенная в измерительной обмотке э. д. с. будет:

$$e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = w_2 S \frac{dB}{dt}. \quad (16-25)$$

При достаточно большом сопротивлении r_2 по сравнению с остальной частью сопротивления цепи ток в измерительной цепи

$$i_2 = \frac{e_2}{r_2} = \frac{w_2 S}{r_2} \frac{dB}{dt}, \quad (16-26)$$

Напряжение на конденсатор C

$$u_c = \frac{1}{C} \int i_2 dt = \frac{1}{C} \frac{w_2 S}{r_2} \int \frac{dB}{dt} dt = \frac{1}{C} \frac{w_2 S}{r_2} B. \quad (16-27)$$

Таким образом, напряжение на конденсаторе пропорционально магнитной индукции в образце.

Подведя через усилитель к одной паре отклоняющих пластин осциллографа напряжение u_c , пропорциональное магнитной индукции в образце, а к другой паре отклоняющих пластин напряжение u_1 , пропорциональное напряженности магнитного поля в образце, на экране осциллографа получим петлю гистерезисного цикла.

Этот способ применим лишь к образцам, в которых вихревые токи практически не возникают (например, ферриты).

16-7. ПОЛУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК С ПРИМЕНЕНИЕМ МОСТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Получение магнитных характеристик мостом переменного тока основано на измерении активного сопротивления r_x и индуктивности L_x обмотки, наложенной на кольцевой образец из испытуемого ферромагнитного материала, и определении по этим величинам магнитных характеристик.

Обычно применяется схема моста для измерения индуктивности, показанная на рис. 10-12,а.

Процесс измерения ничем не отличается от рассмотренного в § 10-8.

Особенности, обусловленные применением стального сердечника, заключаются в следующем: катушка со стальным сердечником представляет собой нелинейное сопротивление, т. е. сопротивление, зависящее от тока (напряжения) в катушке. Поэтому при снятии магнитных характеристик следует изменять в широких границах и измерять ток в обмотке или напряжение в диагонали моста.

Кроме того, наличие ферромагнитного сердечника связано с появлением высших гармоник, поэтому уравновесить мост можно только на одной гармонике. Обычно уравновешивают на основной гармонике. Для этого

нужен нулевой индикатор с острой настройкой на основную гармонику или на выходе моста должен быть применен фильтр.

При измеренном на входе моста напряжении ток в испытуемой обмотке

$$I = \frac{\dot{U}}{Z_x + Z_2}. \quad (16-28)$$

Приняв во внимание, что $Z_2 = r_2$ и $Z_x = r_x + j\omega L_x$, для уравновешенного моста можно написать:

$$r_x = \frac{r_2 r_3}{r_0} \quad (16-29)$$

и

$$L_x = C_0 r_2 r_3. \quad (16-30)$$

Тогда ток в испытуемой катушке

$$I_x = \frac{U}{\sqrt{\left(\frac{r_2 r_3}{r_0}\right)^2 + (\omega C_0 r_2 r_3)^2}}. \quad (16-31)$$

Максимальная напряженность поля в образце

$$H_m = \sqrt{2} \frac{I_x \omega}{l}, \quad (16-32)$$

где l — длина средней магнитной линии в кольцевом сердечнике;

ω — число витков испытуемой катушки.

Максимальная индукция в образце

$$B_m = \sqrt{2} B = \sqrt{2} \frac{L_x I_x}{\omega S}, \quad (16-33)$$

где $L_x = \frac{\Psi}{I_x} = \frac{BS\omega}{I_x}$ — измеренная индуктивность;

Ψ — потокосцепление испытуемой катушки;

S — сечение образца.

Мощность потерь на гистерезис и вихревые токи, отнесенная к 1 кг стали,

$$P = \frac{(r_x - r) I^2}{G}, \quad (16-34)$$

где r — сопротивление испытуемой катушки при постоянном токе;

G — вес образца, кг.

Отечественная промышленность выпускает для магнитных измерений мосты типа У-520.

16-8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ ВАТТМЕТРОВЫМ МЕТОДОМ

При переменном токе за каждый период сталь подвергается перемагничиванию, вследствие чего в стали возникают потери на перемагничивание (потери на гистерезис).

Кроме того, изменение магнитного потока вызывает появление в стали вихревых токов, которые обуславливают потери на вихревые токи.

Величина мощности потерь на гистерезис

$$P_r = \eta f B_m^n V, \quad (16-35)$$

где P_r — мощность потерь на гистерезис, вт;

η — коэффициент гистерезиса;

f — частота;

V — объем стали, см³;

$n = 1,6—2$ (в зависимости от магнитной индукции).

Мощность потерь на вихревые токи

$$P_v = \xi f^2 \Delta^2 B_m^2 V, \quad (16-36)$$

где ξ — коэффициент вихревых токов;

Δ — толщина стальных листов, мм.

Как видно из приведенных формул, для данного сорта стали потери зависят от частоты переменного тока и максимальной индукции.

Для определения и разделения мощности потерь в стали ваттметровым методом, идея которого принадлежит М. О. Доливо-Добровольскому, применяют аппарат для испытания стали.

Аппарат для испытания стали (рис. 16-16) состоит из четырех длинных ($l \approx 0,5$ м) катушек, укрепленных на деревянной раме, и четырех зажимов для крепления образцов стали.

Каждая из катушек имеет две обмотки с одинаковым числом витков. Внутри катушек закладываются че-

тыре пакета стали, образующие замкнутый магнитопровод. Каждый пакет набирается из полос листовой стали длиной 0,5 м и шириной 3 см. Для изоляции между листами прокладывается тонкая (папирсовая) бумага. Половина полос должна быть нарезана из листов в направ-

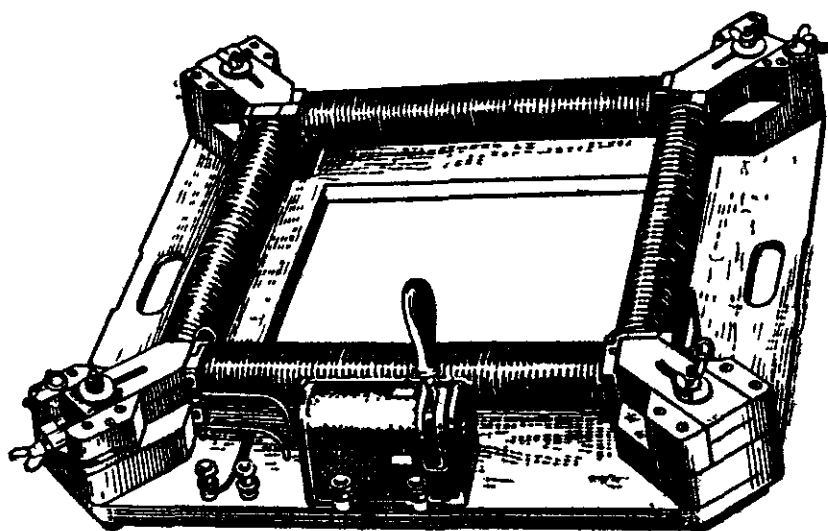


Рис. 16-16 Аппарат для испытания стали.

лении прокатки листов, а другая половина — в направлении, перпендикулярном прокатке. Вес пакетов должен быть около 10 кг.

Схема соединения аппарата и необходимых для определения мощности потерь приборов дана на

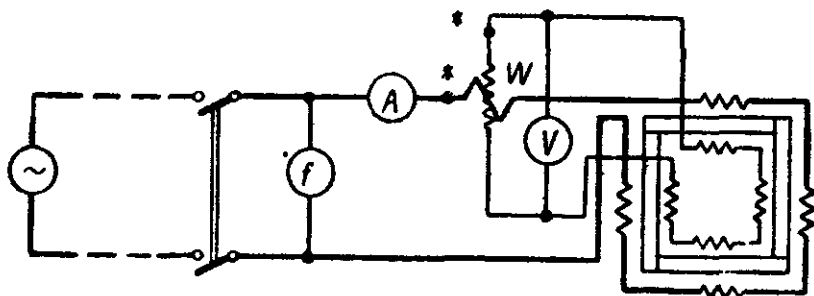


Рис. 16-17, Схема соединения для испытания стали ваттметровым методом.

рис. 16-17. При прохождении по цепи переменного тока ваттметр будет измерять мощность P , которая состоит из:

1) мощности потерь в стали $P_c = P_r + P_v$;

2) мощности потерь в обмотке вольтметра $P_v = \frac{U^2}{r_v}$;

3) мощности потерь в параллельной обмотке ваттметра

$$P_U = \frac{U^2}{r_w}.$$

Следовательно, можем написать:

$$P = P_c + P_v + P_U,$$

откуда легко определить величину мощности потерь в стали

$$P_c = P - (P_v + P_U).$$

Разделив мощность потерь в стали на вес стали G , можно определить мощность потерь, отнесенную к 1 кг стали, $P_{c0} = P_c / G$. Так как мощность потерь в стали зависит от величины магнитной индукции, то необходимо знать, к какой величине магнитной индукции относится та или иная величина потерь.

Величину напряжения U , измеряемую вольтметром, можно считать приближенно равной величине индуктированной во вторичных обмотках аппарата э. д. с., так как падение напряжения в обмотках невелико. Следовательно, можно написать:

$$U \approx E = 4,44 f \omega S B_m \cdot 10^{-8},$$

откуда

$$B_m \approx \frac{U}{4,44 f \omega S} 10^8,$$

где ω — число витков вторичных обмоток;

S — сечение стали, см^2 .

16-9. РАЗДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ В СТАЛИ

Схема соединения приборов для разделения потерь дана на рис. 16-17. Установка должна питаться от источника, допускающего регулировку частоты в пределах 20—60 гц.

Если определить мощность потерь в стали при постоянной индукции и разных частотах, то по этим данным можно построить кривую зависимости мощности потерь от частоты, т. е. построить кривую $P_c = F(f)$, (рис. 16-18).

Как известно, мощность потерь в стали

$$P_c = P_r + P_v = \eta f B_m^n V + \xi f^2 \Delta^2 B_m^2 V. \quad (16-37)$$

При постоянной индукции для образца стали

$$P_c = P_r + P_v = \alpha f + \beta f^2, \quad (16-38)$$

где $\alpha = \eta B_m^n V$ представляет собой мощность потерь на гистерезис за один период, а

$$\beta = \xi \Delta^2 B_m^2 V.$$

Если разделить полученное выражение (16-38) на частоту, то получим мощность потерь в стали за один период

$$P'_c = \frac{P_c}{f} = \alpha + \beta f. \quad (16-39)$$

Если имеем кривую $P_c = F(f)$ при $B_m = \text{const}$ (рис. 16-18), то, разделив ординаты этой кривой на со-

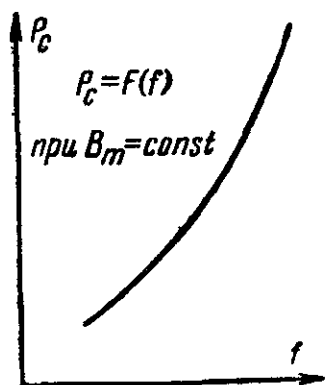


Рис 16-18. Кривая мощности потерь в стали в зависимости от частоты.

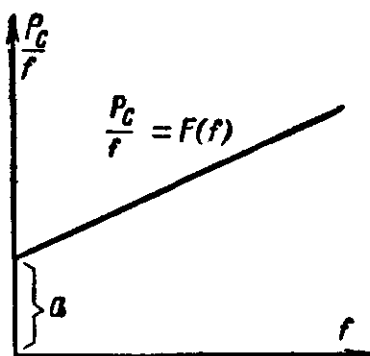


Рис. 16-19. Графический способ разделения мощности потерь в стали.

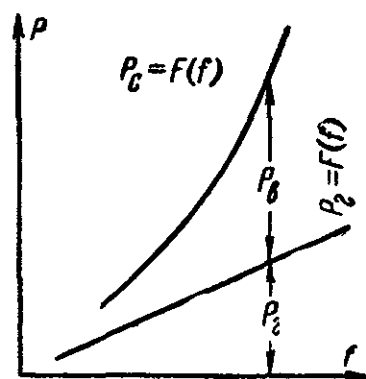


Рис. 16-20. Кривые мощности потерь в стали в зависимости от частоты.

ответствующую частоту f , получим значения ординат новой кривой (рис. 16-19), кривой мощности потерь в стали за один период в зависимости от частоты, т. е. кривой $P'_c = F(f)$. Но из выражения (16-39) видно, что новая кривая (рис. 16-19) будет прямой линией, причем отрезок, отсекаемый этой прямой на оси ординат, будет равен α , т. е. будет представлять собой мощность потерь на гистерезис за один период. Умножая графически полученную величину на частоту, получаем мощность потерь в стали на гистерезис при различных частотах.

Вычитая из общей мощности потерь в стали при определенной индукции и определенной частоте полученные мощности потерь на гистерезис при соответствующих индукциях и частотах, получаем мощность потерь в стали на вихревые токи (рис. 16-20). Таким образом, мы можем разделить потери в стали на гистерезис и вихревые токи при постоянной индукции и разных числах периодов.

Получая опытным путем потери в стали при какой-либо новой индукции при различных числах периодов, мы точно так же можем разделить потери на гистерезис и вихревые токи.

Глава семнадцатая

ИЗМЕРЕНИЯ НЕЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

17-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Измерение неэлектрических величин электрическими методами представляет собой обширную область измерительной техники.

Широкое применение электрических методов измерения неэлектрических величин объясняется возможностью непрерывного измерения и регистрации измеряемой величины, возможностью производить измерение на расстоянии, высокой точностью и чувствительностью измерений и широким диапазоном значений измеряемой величины.

Современное производство в условиях социалистического планового хозяйства характеризуется строжайшим соблюдением технологического процесса, что может быть обеспечено только средствами измерительной техники и автоматики. Поэтому современные советские заводы и фабрики насыщены самыми разнообразными контрольно-измерительными устройствами.

В большинстве случаев электрические измерения неэлектрических величин сводятся к тому, что неэлектрическая величина преобразуется в зависимую от нее электрическую величину, измеряя которую, получаем возможность определения искомой неэлектрической величины.

Элемент измерительного устройства, предназначенный для преобразования неэлектрической величины

в электрическую, называется измерительным преобразователем.

Преобразователи можно разделить на две основные группы: параметрические и генераторные.

В преобразователях первой группы измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в один из электрических параметров r , L или C , для измерения которых необходимо применение источника питания (э. д. с.), в соответствии с чем эти преобразователи подразделяются на следующие подгруппы:

1. Реостатные преобразователи. В основу работы этих преобразователей положена зависимость сопротивления реостата от измеряемой неэлектрической величины, воздействующей на его движок. Они применяются для измерения уровня и объема жидкостей, для измерения перемещения деталей и т. д.

2. Преобразователи контактного сопротивления. В основу работы этих преобразователей положено изменение контактного сопротивления под воздействием измеряемой величины. Они применяются для измерения механических деформаций, давлений и т. д.

3. Проволочные преобразователи. Работа их основана на изменении сопротивления проволоки при ее деформации. Применение то же, что и преобразователей, указанных в п. 2.

4. Преобразователи термосопротивления. В основе работы термосопротивлений лежит зависимость температуры и сопротивления при тепловом равновесии не только от тока, но и от ряда физических величин, определяющих окружающую среду.

Термосопротивления применяются для измерения температур, скорости движения воздуха, для определения состава газа, для измерения вакуума и т. д.

5. Электролитические преобразователи. В основу работы их положена зависимость электрического сопротивления раствора электролита от его концентрации.

Они применяются для измерения концентрации растворов электролитов, для количественного анализа жидкостей и газов, растворимых в жидкости.

6. Магнитоупругие преобразователи. В основу работы этих преобразователей положена зави-

симость магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника преобразователя, а следовательно, и индуктивного сопротивления преобразователя от механических напряжений, действующих на сердечник. Они применяются для измерения механических величин.

7. Индуктивные преобразователи. В основу их работы положено изменение индуктивности преобразователя, вызванное изменением положения одной из его частей под действием измеряемой величины. Они применяются для измерения механических величин: силы, давления, линейного перемещения.

8. Емкостные преобразователи. В основу их работы положено изменение емкости преобразователя под действием измеряемой величины.

Эти преобразователи применяются для измерения механических величин: силы, давления, линейного перемещения, угла поворота, содержания влаги и т. д.

9. Фотоэлектрические преобразователи. В основу работы этих преобразователей положено получение фототока, определяемого световым потоком, зависящим от измеряемой неэлектрической величины, или получение импульсов фототока, частота которых зависит от измеряемой величины.

Они применяются для измерения линейных размеров, измерения температур, прозрачности и мутности жидкости и газовой среды.

10. Ионизационные преобразователи. В основу работы этих преобразователей положена зависимость ионизационного тока от ряда факторов.

Они применяются для анализа газа и определения его плотности, определения геометрических размеров изделий и т. д.

Преобразователи, в которых измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в э. д. с., называются генераторными. В зависимости от характера э. д. с. эти преобразователи подразделяются на следующие подгруппы:

1. Индукционные преобразователи. В основу их работы положено преобразование измеряемой неэлектрической величины в индуктированную э. д. с.

Они применяются для измерения скорости линейных или угловых перемещений.

2. Термоэлектрические преобразователи. В основу их работы положен термоэлектрический эффект, возникающий в цепи термопары в зависимости от разности температур рабочих и нерабочих концов термопары. Применяются для измерения температур.

3. Пьезоэлектрические преобразователи. В основу их работы положен пьезоэлектрический эффект, возникающий в кристаллах под действием механических сил.

Они применяются для измерения механических сил давлений и геометрических размеров изделий.

Устройство для измерения неэлектрических величин электрическим путем в простейшем случае состоит из трех элементов: преобразователя, соединительных проводов и измерительного механизма, шкала которого градуируется в значениях измеряемой неэлектрической величины.

В большинстве же случаев измерения неэлектрических величин измерительное устройство усложняется применением: 1) сложных схем (мостовых, компенсационных); 2) источников питания; 3) стабилизаторов; 4) выпрямителей; 5) усилителей и т. д.

Ввиду большого многообразия измерительных приборов для измерения неэлектрических величин электрическим путем мы остановимся только на рассмотрении принципа работы и устройства некоторых наиболее широко применяемых измерительных преобразователей.

17-2. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

а) Реостатные преобразователи

Реостатный преобразователь представляет собой реостат, движок которого перемещается под воздействием измеряемой неэлектрической величины; следовательно, величина сопротивлений реостата r зависит от измеряемой величины x :

$$r = f(x).$$

Таким образом, по найденному значению r можно определить x .

На рис. 17-1 показана схема устройства реостатного преобразователя. Обмотка его выполнена из манганина. Щетки перемещаются по обмотке посредством поводка,

укрепленного на оси, связанной с объектом измерения.

Наиболее часто применяемые электрические схемы с реостатными преобразователями показаны на рис. 17-2, *а*, *б* и *в*. В первых двух схемах использованы однорамочные измерительные механизмы магнитоэлектрической системы, а в схеме *в* применен двухрамочный измерительный механизм той же системы. Шкалы приборов непосредственно градуируются в значениях измеряемой неэлектрической величины.

На рис. 17-3 в качестве примера показано применение реостатного преобразователя для указания уровня или объема жидкости.

В баке с измеряемой жидкостью помещен поплавок, положение которого определяется объемом или уровнем жидкости; изменение положения поплавка вызывает изменение сопротивлений r_1 и r_2 , включенных последовательно с катушками логометра. Изменение сопротивлений меняет отношение токов в катушках логометра и вызывает изменение его показаний. Шкала прибора непосредственно градуирована в значениях уровня (объема) измеряемой жидкости.

б) Преобразователи контактного сопротивления

Эти преобразователи выполняются или с угольными шайбами, или с тензолитовой нитью.

В первом случае преобразователь представляет собой столбик из 10—15 угольных шайб (рис. 17-4), зажатый между двумя латунными дисками стержнями *а* и *б*.

Электрическое сопротивление такого столбика зависит от степени его сжатия (рис. 17-5), так как при этом изменяется переходное сопротивление между шайбами. Это дает возможность по изменению электрического сопротивления столбика определять измеряемую силу P , действующую на стержень *б*.

Применение двух угольных столбиков (рис. 17-6), при воздействии на которые измеряемая сила P вызывает увеличение сжатия одного из них и уменьшение сжатия другого, увеличивает точность измерения.

Включая два столбика в два смежных плеча одинарного моста, можно устранить влияние температуры на результат измерения.

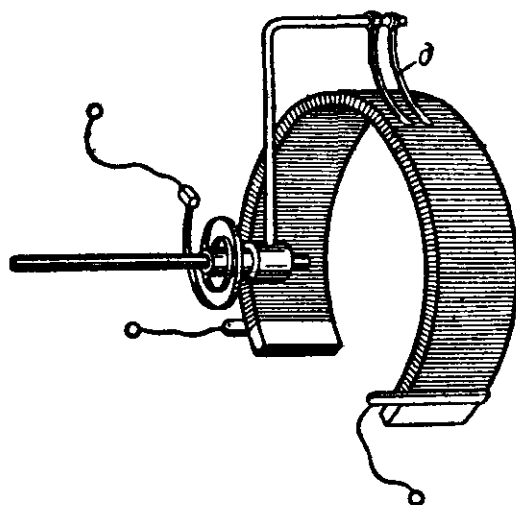
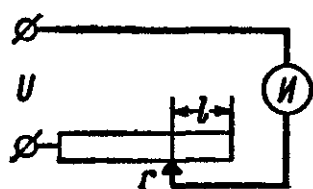
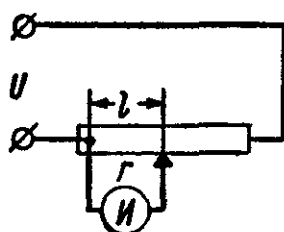


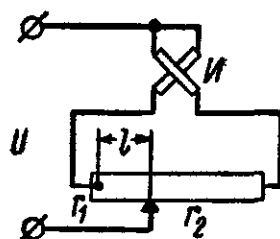
Рис 17-1 Реостатный преобразователь.



а)



б)



в)

Рис. 17-2 Схемы с реостатным преобразователем.

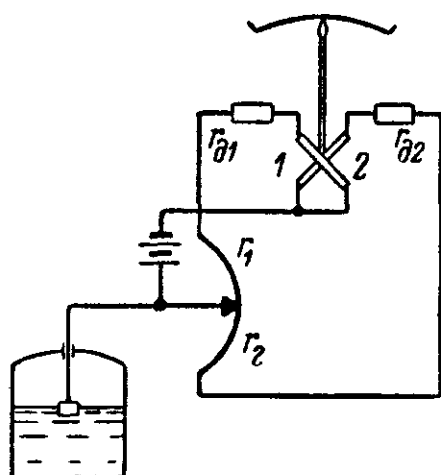


Рис. 17-3. Схема уровнемера.

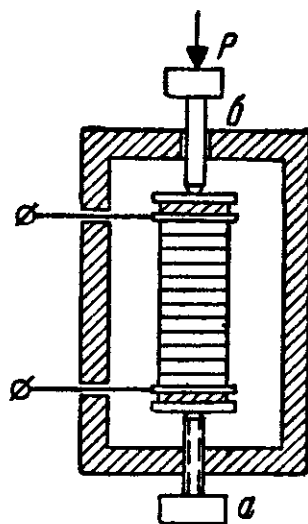


Рис. 17-4. Преобразователь с угольными шайбами.

Тензолит представляет собой смесь графита с бакелитовым лаком. Отрезки тонкой тензолитовой нити (с заделанными в ее концы медными выводными проводами) приклеиваются по всей длине к тонкой бумаге, которая в свою очередь наклеивается на испытываемую

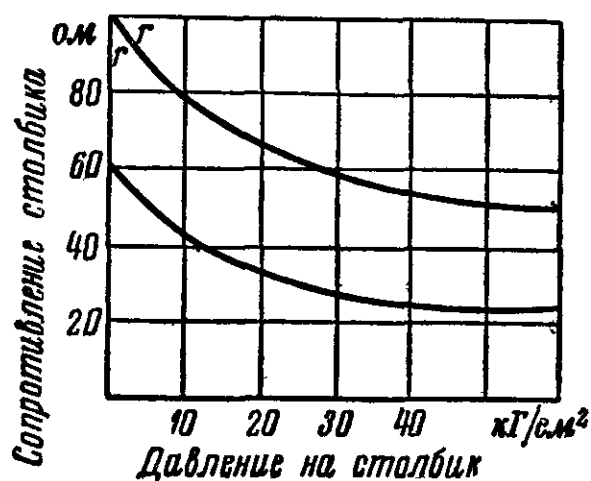


Рис 17-5. Зависимость сопротивления столбика с угольными шайбами от сжатия.

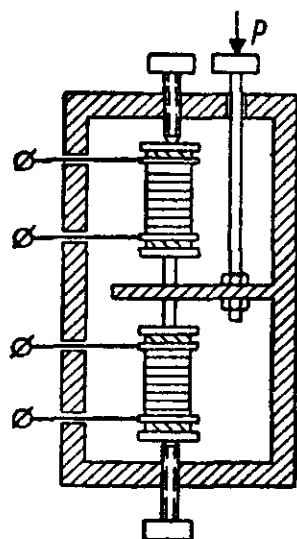


Рис. 17-6. Дифференциальный преобразователь с угольными шайбами.

деталь, механическое напряжение в которой нужно измерить.

Наклейка должна быть такой, при которой все деформации испытываемой детали будут передаваться нити. Тогда при сжатии сопротивление нити будет уменьшаться за счет увеличения контакта между частицами графита, а при растяжении, наоборот, увеличиваться.

Относительное изменение сопротивления тензолитовой нити пропорционально относительной деформации, т. е.

$$\frac{\Delta r}{r} = k \frac{\Delta l}{l},$$

где $k = \frac{\Delta r/r}{\Delta l/l}$ — относительная чувствительность.

Сопротивление тензолитовых преобразователей обычно составляет несколько сотен ом.

в) Проволочные преобразователи

Проволочный преобразователь изготавливается из тонкой проволоки диаметром 0,02—0,04 мм, к концам которой привариваются выводные медные проводники

(рис. 17-7). Проволока закрепляется при помощи специального клея между двумя листочками тонкой бумаги.

Такой преобразователь приклеивается на поверхность испытуемой конструкции или детали и воспринимает ее деформации. Под влиянием деформации меняются размеры, удельное сопротивление материала, а следовательно, и сопротивление проволоочного преобразователя. По относительному изменению сопротивления преобразователя можно определить механические напряжения, возникающие в испытуемой конструкции или детали.

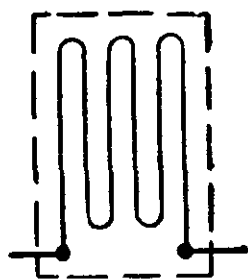


Рис. 17-7.
Схема проволоочного преобразователя.

Проволоки преобразователей изготавливаются из константана, нихрома или железо-хромалюминиевого сплава № 2 — материалов, обладающих большой относительной чувствительностью $k = \frac{\Delta r/r}{\Delta l/l}$, малым температурным коэффициентом и большим удельным сопротивлением.

Площадь проволоочного преобразователя колеблется от 0,1 до 100 см.²

Сопротивление преобразователя — несколько сотен ом, а относительное изменение сопротивления ($\Delta r/r$), обычно не превышает нескольких десятых долей процента.

Для устранения температурной погрешности применяют два одинаковых преобразователя: один — «рабочий», другой — «нерабочий», которые включаются в два смежных плеча одинарного моста. «Рабочий» преобразователь наклеивается на поверхность испытуемой детали, а «нерабочий» — на поверхность из такого же металла, что и испытуемая деталь.

Оба преобразователя ставятся в одинаковые температурные условия. Мост, применяемый для измерений, может быть как уравновешенным, так и неуравновешенным. Так как изменение сопротивления преобразователя мало, измерительная схема должна обладать высокой чувствительностью.

Проволоочные преобразователи, так же как и тензолитовые, являются «разовыми» преобразователями, т. е. наклеиваемыми только 1 раз.

Партия преобразователей, изготовленная из одной и той же проволоки, при одинаковом их сопротивлении и одинаковой технологии наклейки обладает характеристиками $r=f(\Delta l/l)$, совпадающими с точностью до 1—2%. Это дает возможность, произведя градуировку, т. е. получив характеристику $r=f(\Delta l/l)$ для одного из преобразователей данной партии, применять эту характеристику и для других преобразователей этой партии.

г) Термосопротивления

При прохождении электрического тока по проводу в нем выделяется тепло. Часть этого тепла идет на нагревание самого провода, другая часть отдается в окружающую среду путем конвекции, теплопроводности (провода и среды) и излучения.

При установившемся тепловом равновесии температура, а следовательно, и сопротивление провода зависят как от величины тока в проводе, так и от причин, влияющих на отдачу тепла в окружающую среду. К этим причинам относятся: конфигурация и размеры провода и арматуры, температура провода и среды, скорость движения среды, ее состав, плотность и др.

Зависимость сопротивления провода от температуры, скорости движения окружающей среды, ее плотности и состава можно использовать для измерения этих неэлектрических величин путем измерения сопротивления провода.

Провод, предназначенный для указанной цели, является измерительным преобразователем и называется термосопротивлением.

Для успешного применения термосопротивления для измерения неэлектрических величин необходимо создать условия, в которых измеряемая неэлектрическая величина оказывала бы наибольшее влияние на величины термосопротивления, в то время как остальные величины, наоборот, по возможности не влияли бы на его сопротивление.

При использовании термосопротивления следует стремиться к уменьшению теплоотдачи через теплопроводность провода и лучеиспускание.

При длине провода, значительно превосходящей его диаметр ($l \geq 500 d$), отдачей через теплопроводность провода можно пренебречь, если разность температур

провода и среды ($\theta = t_n - t_c$) не превышает 100°C . Если указанными отдачами тепла нельзя пренебречь, то их учитывают при градуировке.

1. Приборы с термосопротивлением для измерения скорости газового (воздушного) потока называются термоанемометрами.

Термосопротивление представляет собой тонкую ($d = 0,02 \div 0,06 \text{ мм}$) проволоку, длина которой в 500 раз больше диаметра.

Если поместить это сопротивление в газовую (воздушную) среду с неизменной температурой ($t_c < t_n$) и пропустить через него постоянный ток ($I = \text{const}$), то, допуская, что отдача тепла происходит только через конвекцию, получим зависимость температуры, а следовательно, и величины термосопротивления от скорости движения газового (воздушного) потока, так как при принятом допущении

$$I^2 r = \xi F \theta, \quad (17-1)$$

где I — ток в термосопротивлении;
 r — величина термосопротивления;
 ξ — коэффициент теплоотдачи, являющийся функцией скорости воздушного потока;
 F — поверхность проволоки (термосопротивления);
 $\theta = t_n - t_c$ — разность температур проволоки и среды.

Очевидно, чем больше скорость потока, тем меньше будут температура и величина термосопротивления (рис. 17-8).

Из уравнения (17-1) следует, что скорость газового потока можно также определить по величине тока в термосопротивлении, если его подбирать так, чтобы при всех скоростях потока термосопротивление r , а следовательно, и разность температур θ оставались неизменными.

Обычно термосопротивление анемометра включают в одно из плеч одинарного моста; тогда в первом случае измерения в диагонали питания моста ток устанавливают и поддерживают неизменным, а на шкале изме-

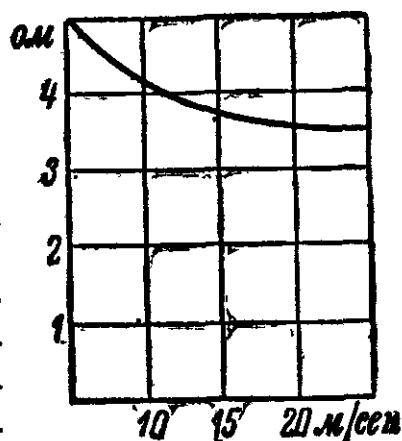


Рис. 17-8. Зависимость сопротивления термоанемометра от скорости потока.

рительного прибора в другой диагонали наносят значения скорости газового потока. Таким образом, мост работает в неуравновешенном режиме.

Во втором случае измерения ток в диагонали питания моста регулируют так, чтобы не нарушалось равновесие моста, и скорость газового потока определяют по показанию амперметра в диагонали питания моста.

2. Прибор для определения содержания газа в смеси с другими газами называется газоанализатором.

Газовая смесь, состоящая из двух газов, не вступающих друг с другом в химическую реакцию, имеет теплопроводность, равную средней арифметической из теплопроводностей составляющих газов, т. е.

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 a + \lambda_2 b}{100},$$

где λ_{12} , λ_1 , λ_2 — теплопроводности смеси и ее составляющих;

a и b — процентное содержание составляющих газовой смеси.

Приняв во внимание, что $b = 100 - a$, можем написать:

$$\lambda_{12} = \frac{\lambda_1 a + \lambda_2 (100 - a)}{100},$$

откуда

$$a = 100 \frac{\lambda_{12} - \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}. \quad (17-2)$$

Таким образом, измерив теплопроводность смеси λ_{12} и зная теплопроводность λ_1 и λ_2 , можно по формуле (17-2) определить процентное содержание одной из составляющих газовой смеси.

В газоанализаторах, работающих на принципе теплопроводности, применяются измерительные преобразователи — термосопротивления.

Для правильной работы газоанализатора необходимо, чтобы температура термосопротивления, а следовательно, и его сопротивление при прохождении по нему тока $I = \text{const}$, зависели только от теплопроводности смеси λ_{12} , т. е. чтобы

$$r = f(\lambda_{12})$$

или

$$r = f_1(a).$$

Для этого необходимо, чтобы потери через теплопроводность проволоки-термосопротивления и путем конвекции были малы или постоянны. Первое из требований удовлетворяют так же, как и в термоанемометрах.

Для выполнения второго требования уменьшают коэффициент теплоотдачи ξ и поверхность проволоки F . Уменьшение коэффициента ξ достигается уменьшением скорости протекания газа. Однако это уменьшение скорости приводит к увеличению инерции преобразователя. Поэтому скорость уменьшают лишь до тех значений, при которых инерция преобразователя не превышает 5—8 мин.

Для уменьшения погрешности от изменения скорости на основании экспериментальных данных рекомендуется при диаметре проволоки 0,02—0,05 мм выбирать диаметр канала 5—7 мм, располагать его вертикально и жестко фиксировать положение проволоки в канале по его оси.

В часто применяемом газоанализаторе на CO_2 рабочая температура проволоки составляет 100—120° С, так как при больших температурах теплопроводность CO_2 приближается к теплопроводности воздуха и чувствительность газоанализатора падает.

На рис. 17-9 дана схема газоанализатора на CO_2 . Он состоит из двух одинаковых термосопротивлений r_1 и r_2 . Первое из них — рабочее — расположено в камере, в которой проходит испытуемая газовая смесь, второе — нерабочее — расположено в закрытой камере с воздухом. Эти термосопротивления включены в два смежных плеча одинарного моста; два других плеча моста создаются сопротивлениями r_3 и r_4 .

Применение рабочих и нерабочих термосопротивлений дает возможность устранить влияние температуры окружающей среды. Если температура окружающей среды изменится, то одинаково изменятся рабочие и нерабочие термосопротивления, что не вызовет изменения тока в измерительной диагонали моста.

Шкала измерителя непосредственно градуируется в значениях процентного содержания CO_2 .

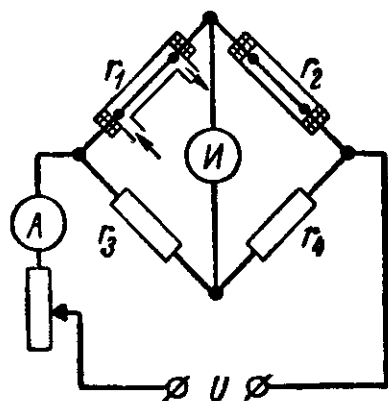


Рис 17-9 Схема газоанализатора CO_2

3. Приборы для измерений температур, в которых в качестве преобразователей используются термосопротивления, называются термометрами сопротивления. Они применяются для измерения температур до 500°C .

В этом случае температура термосопротивления должна определяться температурой измеряемой среды и не должна зависеть от тока в преобразователе.

Термосопротивление должно изготавливаться из материалов с большим температурным коэффициентом сопротивления.

Наиболее часто применяются платина (до 500°C), медь (до 150°C) и никель (до 300°C).

Для платины зависимость сопротивления от температуры в пределах $0-500^{\circ}\text{C}$ можно выразить уравнением

$$r_t = r_0(1 + \alpha_{\text{п}}t + \beta_{\text{п}}t^2),$$

где

$$\alpha_{\text{п}} = 3,94 \cdot 10^{-3} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}, \text{ а } \beta_{\text{п}} = -5,8 \cdot 10^{-7} \text{ } 1/^{\circ}\text{C}^2.$$

Для меди зависимость сопротивления от температуры в пределах 150°C можно выразить как

$$r_t = r_0(1 + \alpha_{\text{м}}t),$$

где

$$\alpha_{\text{м}} = 0,00428 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}.$$

Зависимость сопротивления никеля от температуры определяется экспериментально для каждой марки никеля, так как температурный коэффициент сопротивления его может иметь разные значения, и кроме того, зависимость сопротивления никеля от температуры нелинейна.

Таким образом, по величине сопротивления преобразователя можно определить его температуру, а следовательно, и температуру среды, в которой находится термосопротивление.

Термосопротивление в термометрах сопротивления представляет собой проволоку, намотанную на каркас из пластмассы или слюды, помещенную в защитную оболочку, размеры и конфигурация которой зависят от назначения термометра сопротивления. Величина термосопротивления часто берется равной 50 или 100 ом.

В термометрах сопротивления можно использовать любую схему для измерения сопротивления. В настоя-

щее время наибольшее распространение получили схемы неуравновешенного моста с магнитоэлектрическим логометром (рис. 17-10) и схема автоматического одинарного моста (рис. 9-28).

В схеме неуравновешенного моста (рис. 17-10) три плеча r_1 , r_2 , r_3 выполняются из манганиновой проволоки, четвертое представляет собой термосопротивление. В из-

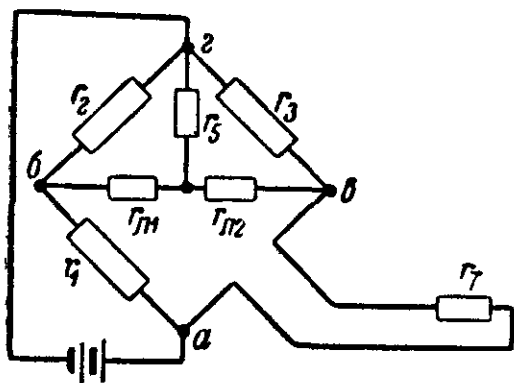


Рис. 17-10 Схема моста с логометром термометра сопротивления.

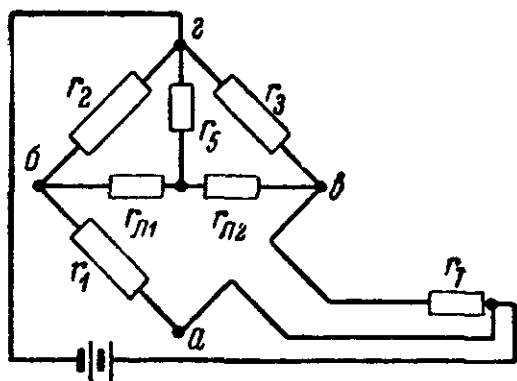


Рис. 17-11. Компенсация влияния сопротивления соединительных проводов.

мерительной диагонали моста включены две рамки логометра. Общая точка их через сопротивление r_5 соединена с вершиной моста $г$.

При равновесии моста, т. е. при $\varphi_б = \varphi_в > \varphi_г$, в рамках логометра идут токи встречного направления, которые будут равны при условии $r_2 = r_3$, $r_1 = r_т$ и $r_{л1} = r_{л2}$.

При неуравновешенном мосте токи в рамках логометра изменяются. Их приращения $\Delta I_{л1}$ и $\Delta I_{л2}$ не равны по величине и имеют противоположные знаки, что обеспечивает поворот подвижной части логометра. Угол поворота ее

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{I_{л1} + \Delta I_{л1}}{I_{л2} + \Delta I_{л2}}\right) = f_1(r_т) = f_2(t).$$

Изменение сопротивления проводов, соединяющих термосопротивление с мостом, вызванное изменением температуры окружающей среды, вызывает погрешность в измерении температуры.

Для устранения этой погрешности одна из вершин диагонали питания моста переносится непосредственно к термосопротивлению (рис. 17-11). Вследствие этого сопротивление одного соединительного провода входит

в плечо моста r_1 , а сопротивление второго соединительного провода — в плечо моста r_T ; следовательно, изменение сопротивлений соединительных проводов не влияет на условия равновесия моста ($r_1 r_3 = r_2 r_T$), а при отсутствии равновесия оно значительно меньше влияет на величины токов в катушках логометра.

Большой интерес для измерения температур представляют объемные полупроводниковые сопротивления с температурным коэффициентом сопротивления, примерно в 10 раз бóльшим, чем у металлов ($-0,03 \div -0,05$) $1/град$.

Полупроводниковые термосопротивления (типа ММТ) изготавливаются керамическими методами из различных окислов (ZnO , MnO) и сернистых соединений (Ag_2S). Они имеют сопротивление 1 000—20 000 $ом$ и могут применяться для измерения температур $-100, +120^\circ C$. Эти сопротивления имеют форму стержней или пластин и обладают малыми размерами. Они пока не могут еще изготавливаться со строго постоянными характеристиками [$r=f(t)$] и не обладают взаимозаменяемостью. Полупроводниковые сопротивления не получили еще массового распространения в термометрах сопротивления.

17-3. ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Удельная электропроводность электролита зависит от концентрации электролита, поэтому по величине сопротивления электролита можно определить его концентрацию.

Измерительный электролитический преобразователь представляет собой сосуд, заполненный испытуемым раствором электролита, в котором расположены два электрода.

Во избежание электролиза измерение сопротивления электролита производится на переменном токе.

Так как электропроводность электролита в очень сильной степени зависит от температуры, то обычно применяется температурная компенсация. Один из термокомпенсаторов показан на рис. 17-2, он представляет собой медно-никелевое сопротивление r_K , расположенное в растворе и соединенное последовательно с развет-

влением из искомого сопротивления r_x и шунтирующего манганинового сопротивления r_1 .

Электролитические преобразователи нашли широкое применение для автоматического контроля многочисленных производственных процессов в ряде отраслей промышленности (пищевая, химическая, текстильная), и в частности, для измерения концентрации солей в конденсате пара и в воде для питания котлов.

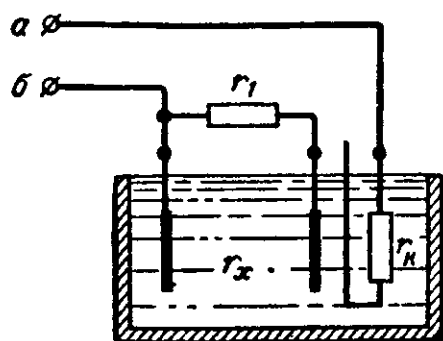


Рис 17-12 Схема электролитического преобразователя.

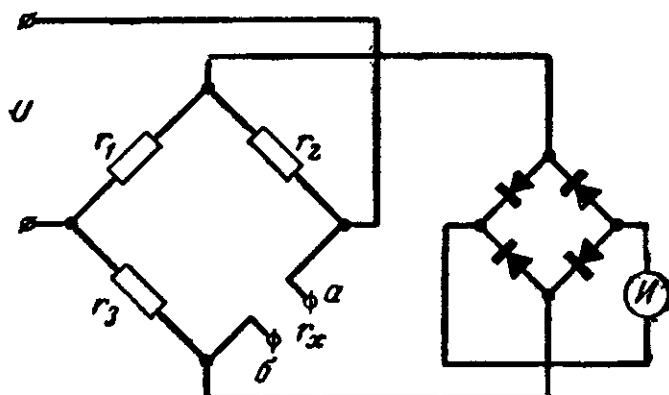


Рис. 17-13. Измерительная схема соленометра

Приборы для автоматического контроля конденсата и воды паросиловых установок называются соленомерами.

На рис. 17-13 дана схема измерительной цепи соленометра для контроля концентрации NaCl в конденсате.

В одном из плеч неуравновешенного одинарного моста (зажимы $a, б$) включен электролитический преобразователь, схема которого дана на рис. 17-12. Мост питается через стабилизатор (на схеме не показан) от сети переменного тока. На выходе моста через меднозакисный выпрямитель включен самопишущий магнитоэлектрический миллиамперметр.

Номинальная величина соленометра $8 \text{ мг NaCl на } 1 \text{ л конденсата}$.

17-4. ИНДУКТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Принципиальная схема одного из индуктивных преобразователей дана на рис. 17-14. Он представляет собой электромагнит, якорь которого может перемещаться под действием измеряемой механической величины P (силы, давления, линейного перемещения). Изменение

положения якоря влечет за собой изменение величины зазора δ , а следовательно, индуктивности катушки электромагнита и ее полного сопротивления. Таким образом,

$$z=f(P).$$

На рис. 17-15 дана схема дифференциального преобразователя, у которого перемещение якоря вызывает увеличение индуктивности одной и уменьшение индук-

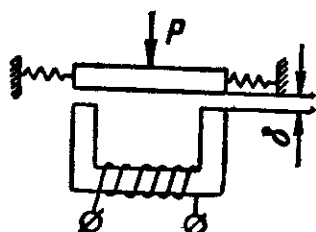


Рис. 17-14. Схема индуктивного преобразователя.

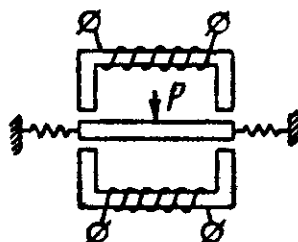


Рис. 17-15. Схема индуктивного дифференциального преобразователя.

тивности другой катушки, что повышает чувствительность преобразователя. Кроме того, включение двух катушек в два смежных плеча моста обеспечивает получение температурной компенсации.

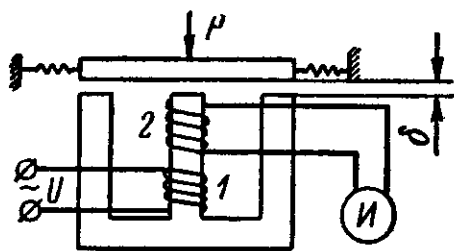


Рис 17-16. Схема индуктивного преобразователя трансформаторного типа.

На рис. 17-16 дана схема индуктивного преобразователя трансформаторного типа. Обмотка 1 питается переменным током, действующее значение которого поддерживается неизменным: $I_1 = \text{const}$. К зажимам обмотки 2 подключен вольтметр. При действии измеряе-

мой величины P изменяется воздушный зазор, магнитное сопротивление цепи, а следовательно, и магнитный поток, пронизывающий обмотку 2. Таким образом, э. д. с. E_2 , наводимая в обмотке 2, будет зависеть от измеряемой величины P , т. е.

$$E_2=f(P).$$

На рис. 17-17 в качестве примера показано устройство дифференциального приемника индуктивного микрометра.

В корпусе 1 из немагнитного материала помещены два сердечника 2 и 3 из мягкой стали с расположенными в них двумя катушками 4. На оси 5 укреплен якорь 6 из мягкой стали. Один конец оси образует мерительную ножку 7, а другой упирается в пружину 8. Диаметр приемника около 50 мм, а высота 90 мм.

По отклонении измеряемого размера от заданного значения якорь перемещается, вследствие чего изменяется индуктивность катушек, и по шкале прибора, включенного в измерительную диагональ моста переменного тока, непосредственно отсчитывается значение измеряемой величины.

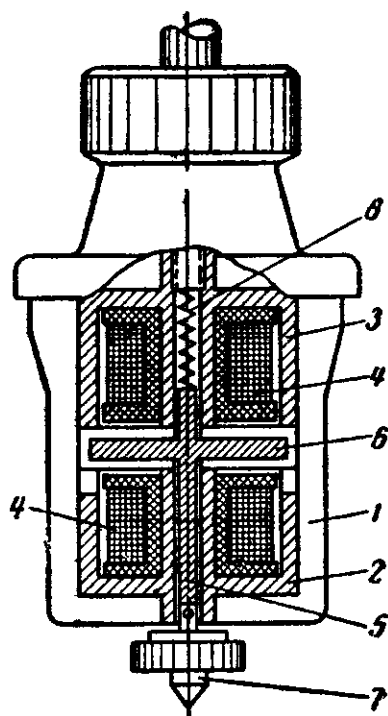


Рис 17-17. Схема индуктивного микрометра.

17-5. ЕМКОСТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Емкостный преобразователь представляет собой плоский (или другой формы) конденсатор, емкость которого $C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{\delta}$ зависит от площади электродов, их взаимного расположения, расстояния между ними, а также от раз-

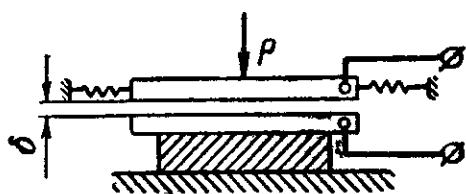


Рис 17-18 Принцип работы емкостного динамометра и манометра.

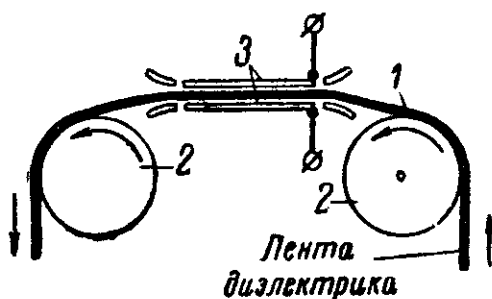


Рис. 17-19. Схема устройства емкостного преобразователя для измерения толщины.

меров диэлектрика и его диэлектрической проницаемости. Эти преобразователи могут применяться для измерения различных неэлектрических величин, значение которых может быть связано с изменением одной из указанных выше величин, определяющих емкость преобразователя.

Емкостные динамометры и манометры работают на принципе изменения воздушного зазора (рис. 17-18) между двумя пластинами конденсатора под действием измеряемой силы или давления.

На рис. 17-19 показан принцип устройства преобразователя прибора для измерения толщины резиновой ленты.

Испытываемая лента протягивается между двумя неподвижными электродами конденсатора.

При неизменной толщине ленты постоянной будет и емкость конденсатора. При изменении толщины ленты будет изменяться воздушный зазор, и благодаря различным величинам диэлектрической проницаемости резины и воздуха будет изменяться и емкость преобразователя.

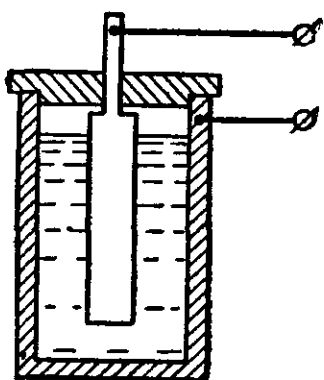


Рис. 17-20. Принцип устройства емкостного преобразователя влаги.

Емкостный преобразователь влагомера зерна, порошка, волокна, пряжи представляет собой цилиндрический конденсатор (рис. 17-20).

Наружный электрод имеет форму стакана, внутренний электрод — форму стержня. Пространство между электродами до определенного уровня заполняется испытываемым материалом. Так как диэлектрическая проницаемость воды ($\epsilon=80$) значительно больше проницаемости остальных веществ, то содержание влаги в испытываемом материале резко влияет на величину емкости преобразователя.

Емкостные преобразователи обычно обладают малой емкостью, а следовательно, при частоте 50 гц огромным емкостным сопротивлением и малой мощностью. Поэтому измерения в цепях с емкостными преобразователями производятся, как правило, на повышенной или высокой частоте с использованием ламповых усилителей.

17-6. ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Фотоэлектрические преобразователи — это фотоэлементы, которые, как известно, делятся на фотоэлементы с внешним фотоэффектом и фотоэлементы с запирающим слоем.

Первые из них бывают вакуумные и газонаполненные.

Катод фотоэлемента представляет собой наложенный на внутреннюю поверхность стеклянной колбы слой серебра, покрытый слоем щелочного металла, например цезия. Анод — металлический, имеет форму кольца или диска, расположен в центре колбы.

Если к аноду и катоду приложить напряжение (рис. 17-21), создав таким образом между ними электрическое поле, а через окно фотоэлемента направить на катод световой поток, то часть электронов катода, получив добавочную энергию от светового потока, будет покидать катод, двигаясь к аноду, и в цепи установится электрический ток — фототок. Фототок прекратится, если прекратить освещение фотоэлемента.

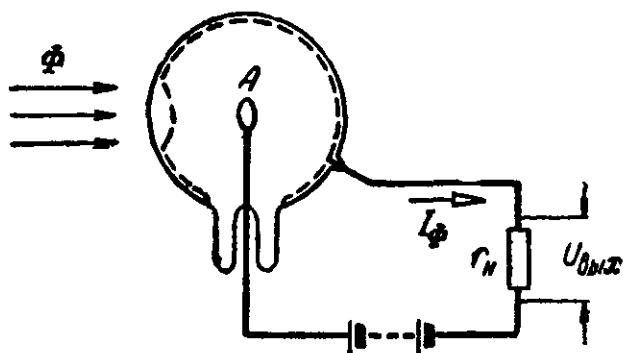


Рис. 17-21. Схема включения фотоэлемента с внешним фотоэффектом.

При постоянном напряжении между анодом и катодом фототок пропорционален световому потоку.

Отношение фототока, выраженного в микроамперах, к световому потоку (всех частей спектра), выраженный в люменах (лм), называется интегральной чувствительностью фотоэлемента.

Для вакуумных фотоэлементов она доходит до 100 мка/лм.

Вакуумный фотоэлемент обладает ничтожной инерцией.

В газонаполненных фотоэлементах колба заполняется обычно аргоном, что значительно повышает чувствительность фотоэлемента.

Наиболее распространенные фотоэлементы — тип СЦВ, сурьмяно-цезиевый вакуумный и тип ЦГ кислородно-цезиевый газонаполненный.

Фототок, проходящий от фотоэлементов, мал и для практического использования обычно подвергается усилению при помощи ламповых усилителей.

В последнее время вместо обычных фотоэлементов иногда применяются фотоэлектронные умножители, в ко-

торых используется принцип усиления фототока посредством вторичной эмиссии электронов эмиттерами, находящимися в самом умножителе.

В результате вторичной эмиссии фототок увеличивается в 7—8 раз. Так, например, в однокаскадном умножителе типа ФЭУ-1 интегральная чувствительность достигает до 800 мка/лм.

Фотоэлементы с запирающим слоем по своему устройству сходны с полупроводниковыми выпрямителями,

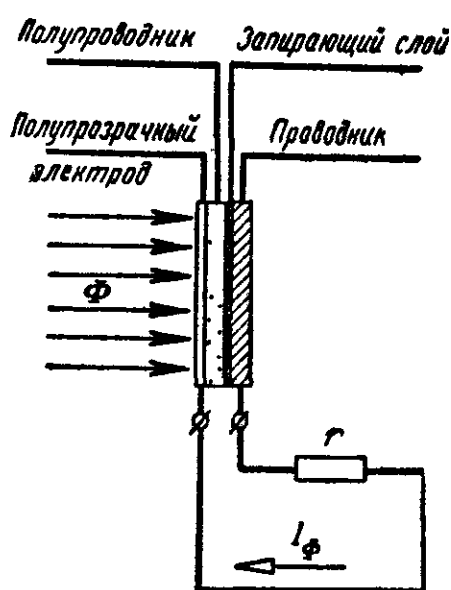


Рис. 17-22. Схема включения фотоэлемента с запирающим слоем.

у которых в тонком слое полупроводника на границе областей с электронной и дырочной проводимостями возникает запирающий слой. У этих фотоэлементов, как и у рассмотренных выше, световой поток увеличивает энергию части электронов полупроводника, делая их свободными, что приводит к возникновению разности потенциалов на *p-n*-переходе.

Устройство фотоэлемента показано на рис. 17-22. Он состоит из металлического диска, на который наложен слой полупроводника (селен, таллий, германий, кремний), а на

него наложен полупрозрачный металлический слой.

При освещении в цепи возникает фототок.

При применении фотоэлементов с запирающим слоем не требуется постороннего источника тока.

Чувствительность фотоэлементов с запирающим слоем значительно выше, что в ряде случаев дает возможность обойтись без применения усилителей.

Фотоэлектрические преобразователи — фотоэлементы, фотоэлектронные умножители — применяются для измерения ряда неэлектрических величин.

Принцип работы фотоэлектрического пирометра — прибора для измерения температур, основанного на применении фотоэлемента, иллюстрируется рис. 17-23.

Световой поток нагретого до достаточно высокой температуры тела — объекта измерения (*о. и.*) непосред-

ственно воздействует на фотоэлемент, вызывая фототок в цепи фотоэлемента, величина которого зависит от интенсивности и от светового потока, а следовательно, и от температуры объекта измерения. По величине фототока судят о температуре тела.

На рис. 17-24 показан принцип работы фотоэлектрических колориметров и дымомеров, приборов для опре-

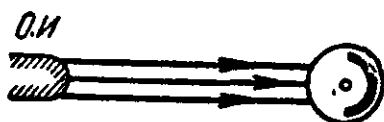


Рис. 17-23. Схема работы фотоэлектрического пирометра.

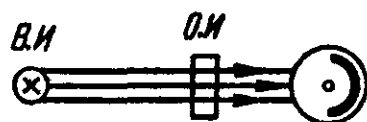


Рис. 17-24. Схема работы фотоэлектрических колориметров.

деления прозрачности или состава жидкости или газа (дыма).

Световой поток, создаваемый вспомогательным источником (в. и.) попадает в фотоэлемент, пройдя через объект измерения, в котором частично поглощается. Степень поглощения, а следовательно, и интенсивность светового

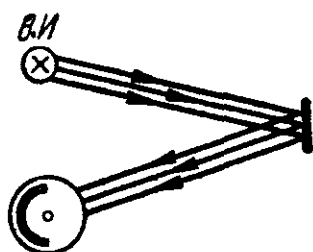


Рис. 17-25. Принцип работы фотоэлектрического импульсного тахометра.

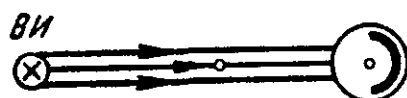


Рис. 17-26. Принцип работы фотоэлектрического прибора для измерения диаметра проволоки.

потока, воздействующего на фотоэлемент, зависит от измеряемого параметра. По величине фототока, зависящей от интенсивности светового потока, воздействующего на фотоэлемент, и судят о значении измеряемой величины.

На рис. 17-25 показан принцип работы фотоэлектрического импульсного тахометра.

Световой поток, создаваемый вспомогательным источником, падает на зеркало, укрепленное на торце вала объекта, скорость вращения которого измеряется. Отраженный от зеркала световой поток попадает на фотоэлемент только в течение одной части оборота. Та-

ким образом, число импульсов в единицу времени или, что то же, частота их пропорциональна скорости вращения. Таким образом, частотомер может быть проградуирован в значениях скорости вращения объекта измерения.

На рис. 17-26 показан принцип работы фотоэлектрического прибора для измерения линейных размеров, например диаметра проволоки, размеров поршневых колец.

На пути светового потока, идущего от вспомогательного источника к фотоэлементу, помещается объект измерения, экранирующий часть светового потока и, следовательно, изменяющий освещенность фотоэлемента. Степень экранирования света, а следовательно, и величина тока фотоэлемента определяются измеряемыми размерами объекта.

Такая же схема применяется для счета изделий, движущихся по конвейеру. В этом случае при прохождении изделия прерывается световой поток, идущий от источника света, и прерывается ток в цепи фотоэлемента. Число перерывов тока равно числу прошедших по конвейеру изделий.

17-7. ИОНИЗАЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

На рис. 17-27 показана структурная схема одного из ионизационных преобразователей с радиоактивным изотопом. Прибор предназначен для непрерывного измерения толщины движущейся ленты или стального проката.

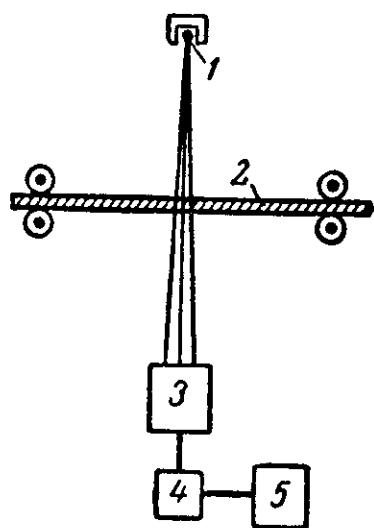


Рис 17-27 Схема ионизационного преобразователя для измерения толщины ленты.

Принцип работы прибора заключается в следующем. Радиоактивное излучение изотопа 1 частично поглощается изделием 2. Количество энергии, полученной индикатором 3, зависит от материала и толщины изделия. Индикатор 3 через усилитель 4 соединен с измерительным механизмом 5, отградуированным в значениях измеряемой величины.

На рис. 17-28 показана схема

устройства уровнемера, работающего на том же принципе.

На поверхности жидкости 1 плавает поплавок 2 с радиоактивным изотопом. Индикатор 3, воспринимающий излучение, расположен над поплавком. При изменении уровня жидкости изменяются расстояние от источника

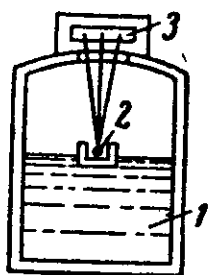


Рис. 17-28.
Схема ионизационного уровнемера.

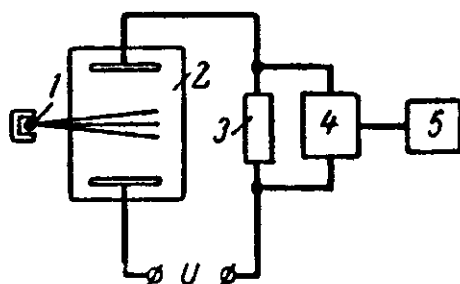


Рис 17-29 Схема прибора для измерения давления газа.

излучения до индикатора и, следовательно, количество энергии, получаемой индикатором.

На рис. 17-29 дана структурная схема измерителя давления газа. Под воздействием радиоактивного излучения изотопа 1 в сосуде 2 происходит ионизация газа. В зависимости от давления газа изменяются интенсивность ионизации и ионизационный ток, проходящий по цепи под действием приложенного напряжения U . Измерительный механизм 5 включается через усилитель 4 на сопротивление 3, падение напряжения на котором создается ионизационным током.

Аналогичное устройство имеют ионизационные анализаторы газа.

17-8. ИНДУКЦИОННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В индукционном преобразователе измеряемая неэлектрическая величина преобразуется в индуктированную э. д. с.

В качестве примера рассмотрим устройство индукционного тахометра — прибора для измерения скорости вращения.

Он представляет собой (рис. 17-30) маленькую магнитоэлектрическую машинку, напряжение на зажимах которой изменяется пропорционально скорости вращения

якоря, расположенного между полюсами постоянного магнита. Так как якорь тахометра при помощи гибкого вала связан с валом машины, скорость которой измеряется, то напряжение на зажимах якоря будет пропорционально скорости вращения.

На рис. 17-31 показана схема устройства индукционного тахометра с вращающимся магнитным полем.

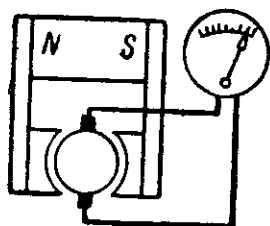


Рис. 17-30. Схема индукционного тахометра.

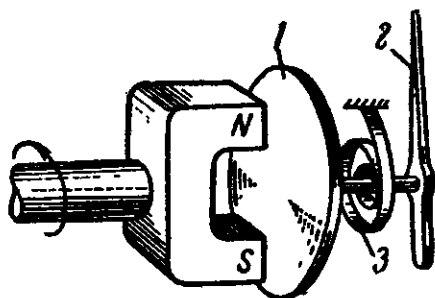


Рис. 17-31. Устройство тахометра с вращающимся полем.

Он состоит из алюминиевого диска 1, укрепленного на одной оси со стрелкой 2. Постоянный магнит *NS* при помощи гибкого вала связан с валом машины, скорость которой измеряется.

При вращении постоянного магнита магнитное поле его, пересекая диск, будет наводить в диске э. д. с. и в диске возникнут вихревые токи.

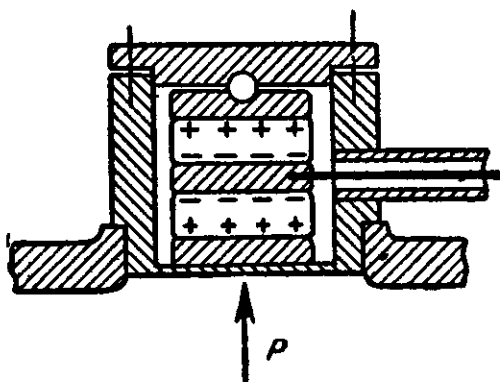
Вращающий момент, созданный взаимодействием вихревых токов с полем магнита, вызывает поворот диска на угол, при котором он уравнивается моментом пружины 3. Таким образом, каждой скорости вращения соответствует определенный угол поворота указательной стрелки, что дает возможность на шкале прибора наносить значения скорости вращения.

17-9. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Прямой пьезоэлектрический эффект, который используется в преобразователях, заключается в появлении электрических зарядов на поверхности некоторых кристаллических диэлектриков (кварц, титанит бария) под воздействием механических напряжений или деформаций.

На рис. 17-32 показана схема устройства пьезоэлектрического преобразователя для измерения давления газа.

Измеряемое давление P действует на мембрану — дно корпуса преобразователя. Две кварцевые пластинки зажаты между тремя металлическими прокладками. Между крышкой корпуса и верхней прокладкой помещается шарик, обеспечивающий равномерность распределения измеряемого давления. К средней прокладке — отрицательному электроду — присоединен провод, проходящий через изоляционную втулку.



Разность потенциалов между отрицательным электродом и корпусом пропорциональна измеряемому давлению. По измеренной разности потенциалов определяют давление.

Рис. 17-32. Пьезоэлектрический преобразователь (кварцевый) для измерения давления газа.

Так как заряды при снятии давления исчезают, то необходимо иметь хорошую изоляцию отрицательного электрода с тем, чтобы за время измерения заряд не успевал заметно изменить свою величину.

Отрицательный электрод соединяется с сеткой первой лампы усилителя, на выходе которого может быть включен осциллограф.

17-10. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Устройство, состоящее из термоэлектрического преобразователя и измерительного механизма, предназначенное для измерения температур, называется термоэлектрическим пирометром.

Термоэлектрический преобразователь представляет собой термопару, соединенную с измерительным механизмом магнитоэлектрической системы (рис. 17-33).

При нагревании рабочего конца термопары возникает термо-э. д. с., величина которой зависит от разности температур между рабочим и свободными концами термопары. Если температура свободных концов остается неизменной, то термо-э. д. с. будет зависеть только от температуры рабочего конца термопары. Термо-э. д. с. вызовет в цепи измерительного механизма ток, а следовательно, и отклонение его подвижной части, по величине которого можно судить о температуре рабочего

конца термопары. Шкала измерительного механизма градуируется в значениях температуры. Рабочий конец термопары помещают в точку, температуру которой надо определить. Провода термопары должны быть достаточно длинными с тем, чтобы свободные концы, присоединенные к соединительным проводам, находились в среде с той температурой, при которой градуировался пирометр.

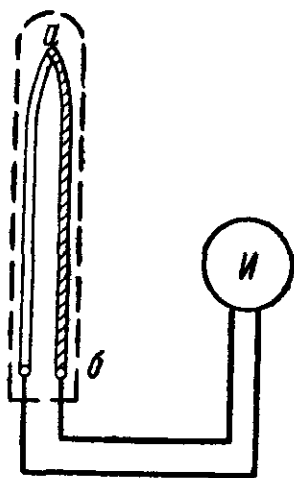


Рис. 17-33 Схема термоэлектрического пирометра.

При измерении высоких температур незначительные колебания температуры свободных концов термопары не вызывают заметной погрешности. При измерении же невысоких температур влияние температуры свободных концов термопары может быть очень значительным, и поэтому иногда для устранения этого влияния свободные концы термопары помещают в термостат с постоянной температурой.

Материалами для термопар служат: медь-константан (до 300°C), медь-копель (до 600°C), железо-копель (до 800°C), хромель-копель (до 800°C), хромель-алюмель (до 1300°C), платина-платинородий (до 1600°C).

Для защиты термопары от механических повреждений и вредных действий горячих газов или паров термопару помещают в защитную трубку из латуни, стали, фарфора или шамота.

Указанные выше сплавы, применяемые для термопар, имеют следующий состав: копель $56,5\% \text{Cu} + 43,5\% \text{Ni}$, хромель $90\% \text{Ni} + 10\% \text{Cr}$, алюмель $1\% \text{Si} + 2\% \text{Al} + 17\% \text{Fe} + 2\% \text{Mn} + 78\% \text{Ni}$.

Глава восемнадцатая

ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЯ (ОБЩИЕ ПОНЯТИЯ)

18-1. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ

Телеизмерения — это специальная область измерительной техники — производство измерений на расстоянии.

Распространенный в технике электрических измерений метод передачи измеряемой величины на незначительные расстояния (измерительный трансформатор — соединительные провода — измеритель-

ный прибор) непригоден по экономическим и техническим соображениям для сколько-нибудь значительных расстояний, так как требует значительной мощности измерительных трансформаторов, значительного количества проводов большого сечения вследствие большой мощности потерь измерительных приборов переменного тока, а также вследствие влияния параметров соединительных проводов на точность измерений.

Сущность телеизмерения заключается в том, что измеряемая электрическая или неэлектрическая величина A преобразуется в другую, однозначно зависящую от первой, вспомогательную величину U , которую можно удобно с достаточной точностью передать по каналу связи на расстояние в пункт наблюдения. Каналом связи могут быть провода линии связи, линии высокого напряжения или радиолинии. На принимающей стороне приемное устройство преобразует вспомогательную величину в показания измерительного прибора, шкала которого градуируется в значениях измеряемой величины.

Передающее устройство, канал связи, приемное устройство с измерительным прибором носят название телеизмерительной системы.

18-2. КЛАССИФИКАЦИЯ СИСТЕМ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ

Свойства и область применения телеизмерительной системы в значительной степени зависят от вспомогательной величины, передаваемой по каналу связи, поэтому эта величина положена в основу их классификации.

Телеизмерительные системы можно разделить на две основные группы:

1. Системы интенсивности, в которых измеряемая величина преобразуется в ток или напряжение, значения которых зависят от значения измеряемой величины.

2. Частотные и импульсные системы, в которых вспомогательными величинами служат частота переменного тока или частота посылаемых импульсов, их продолжительность, число импульсов или их сочетание.

В системах первой группы на вспомогательную величину оказывают влияние параметры канала связи, вследствие чего возникают погрешности, возрастающие с увеличением длины канала связи. Поэтому системы интенсивности применяются при сравнительно небольших расстояниях передачи (до 20—30 км).

В частотных и импульсных системах показания прибора зависят от частоты переменного тока или частоты импульсов, их продолжительности, числа импульсов или их сочетания, т. е. от величин, не зависящих от параметров канала связи. Следовательно, эти системы могут применяться для больших расстояний — не только в десятки, но и в сотни километров.

18-3. ТЕЛЕИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ИНТЕНСИВНОСТИ

В системах интенсивности измеряемая величина преобразуется в малые значения тока (до 10 ма) и малые значения напряжения (до нескольких вольт или десятков вольт), для того чтобы можно было использовать кабельные и воздушные линии слабого тока.

Предпочтительнее применять постоянные ток и напряжение, так как в этом случае, с одной стороны, можно использовать чувствительный магнитоэлектрический измерительный механизм и, с другой — индуктивность и емкость канала связи не влияет на точность измерений.

Преобразование измеряемой величины в соответствующие значения тока или напряжения выполняются прямым или компенсационным способом.

Первый способ заключается в том, что в зависимости от значения измеряемой величины изменяется один из параметров цепи те-

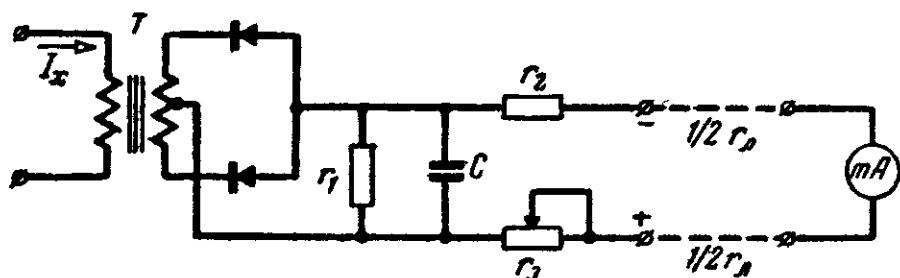


Рис. 18-1. Выпрямительная система телеизмерения тока ВПТ-2 завода «Электропульт».

лепередачи, например сопротивление ее при постоянном напряжении источника питания или, наоборот, при постоянном сопротивлении изменяется э. д. с. источника питания.

При этом способе изменение сопротивления проводов линии связи (например, от температуры) и изменение сопротивления изоляции их вызывают погрешность измерения.

Второй способ отличается от первого тем, что при преобразовании измеряемой величины во вспомогательную между ними автоматически поддерживается постоянное соотношение.

Компенсационный способ выполняется при помощи систем регулируемым током и потенциометрических систем напряжения.

Компенсационные способы в значительной степени уменьшают влияние параметров линии связи на точность измерения.

В качестве примера одной из телеизмерительных систем интенсивности рассмотрим выпрямительную систему для измерения тока типа ВПТ-2 завода «Электропульт» (рис. 18-1).

Здесь ток I_x , подлежащий измерению, после трансформации выпрямляется двухполупериодным германиевым выпрямителем. Для сглаживания пульсации выпрямленного тока применяется конденсатор C . Влияние температуры на коэффициент выпрямления выпрямителя и связанное с ним изменение тока линии устраняются применением сопротивления r_1 из меди.

Величина тока в линии связи, помимо напряжения на зажимах вторичной цепи, зависит от сопротивления линии r_n , добавочного сопротивления r_2 из манганина и подгоночного сопротивления r_3 . Сопротивление r_2 , порядка 25 ком обеспечивает постоянство сопротивления вторичной цепи. Таким образом, среднее значение выпрямленного тока, проходящего через миллиамперметр магнитоэлектрической системы, будет пропорционально току I_x .

18-4. ЧАСТОТНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ

Частотные и импульсные системы делятся на следующие:

- 1) частотные;
- 2) время-импульсные;
- 3) число-импульсные;
- 4) кодо-импульсные.

При частотном методе телеизмерения значение измеряемой величины определяется по частоте импульсов постоянного тока в канале (частотно-импульсная система) или по частоте переменного

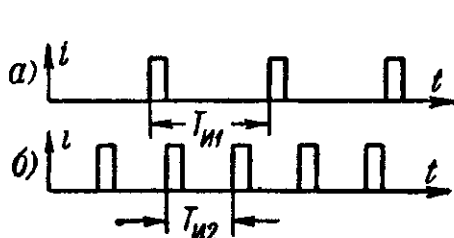


Рис. 18-2. Графики тока частотно-импульсной системы.

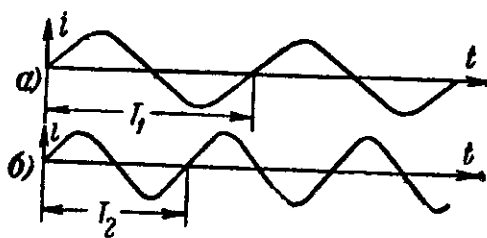


Рис. 18-3. Графики тока частотной системы переменного тока.

тока (частотная система переменного тока). На рис. 18-2 даны графики тока в канале связи для частотно-импульсной системы, а на рис. 18-3 — графики тока для частотной системы переменного тока. На рис. 18-2,а и 18-3,а даны графики для токов меньшей частоты, соответствующие меньшим значениям измеряемых величин, а на рис. 18-2,б и 18-3,б — графики токов большей частоты, соответствующие большим значениям измеряемых величин.

При время-импульсных методах значение измеряемой величины определяется продолжительностью времени импульса τ при неизменном времени периода T_1 . На рис. 18-4,а показан график тока в канале связи с меньшим временем импульса, чем на графике рис. 18-4,б ($\tau_1 < \tau_2$), что соответствует меньшему значению измеряемой величины в первом случае по сравнению со вторым.

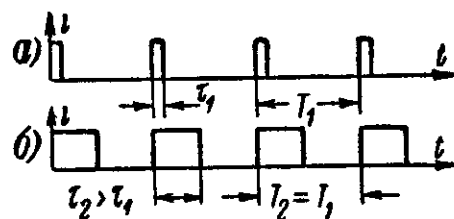


Рис. 18-4. Графики тока время-импульсной системы.

При число-импульсных методах телеизмерения значение измеряемой величины определяется числом импульсов N , посылаемых в канал связи или через определенные промежутки времени, или при изменении измеряемой величины.

При кодо-импульсных методах значение измеряемой величины определяется шифровкой комбинацией импульсов (код). Например, на рис. 18-5 дан график десятичного кода, в котором выделены путем удлинения импульсы: 5 — соответствующий группе единиц и 3 — соответствующий группе десятков, таким образом, значение измеряемой величины соответствует 35.

В качестве примеров рассмотрим одну из частотно-импульсных систем.

На рис. 18-6 дана принципиальная схема частотно-импульсной системы Мосэнерго.

Для преобразования измеряемой мощности в импульсы применен преобразователь — индукционный счетчик 1, на оси которого

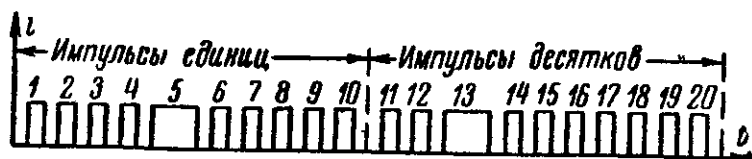


Рис. 18-5. График десятичного кода.

укреплен коллектор-прерыватель 2. Он имеет две или четыре пластины, которые соединены между собой. На коллектор наложены две щетки. Если щетки прикасаются к пластинкам, то в цепи с напряжением U_1 будет ток. Так как скорость вращения диска преоб-

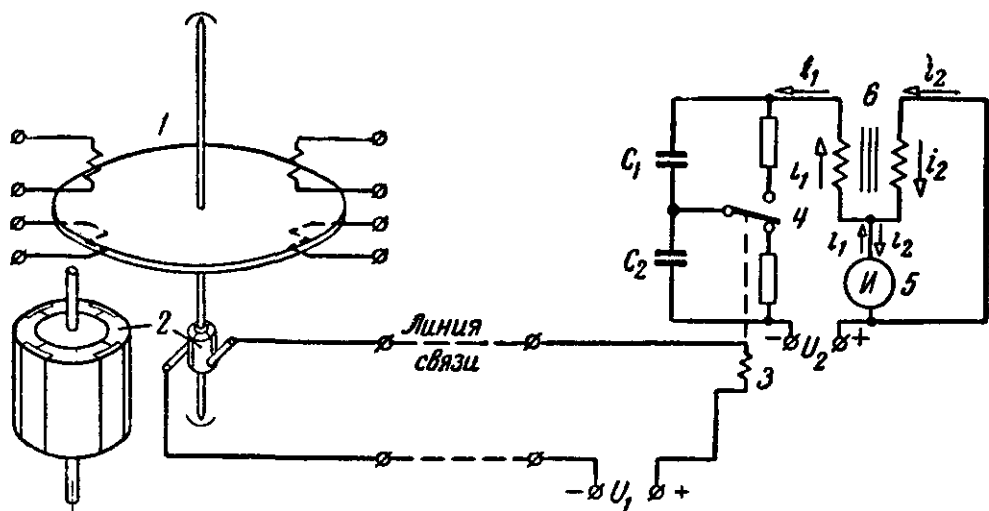


Рис. 18-6. Схема частотно-импульсной системы.

разователя пропорциональна мощности цепи, в которую он включен (измеряемой мощности),

$$n = k'P,$$

то число замыканий цепи, т. е. число импульсов в единицу времени или, что то же, частота импульсов, также будет пропорциональна мощности

$$f = mn = mk'P,$$

где m — число пластин коллектора-прерывателя, равное числу импульсов тока в линии связи за один оборот счетчика.

На приемной стороне эти импульсы воздействуют на линейное реле 3, вызывая переключение ножа переключателя 4 и поочередные заряд и разряд конденсаторов C_1 и C_2 .

При постоянном напряжении U_2 приемной цепи при каждом переключении конденсаторов в цепи протекает заряд

$$q = CU_2,$$

следовательно, среднее значение тока в измерительном механизме 5 магнитоэлектрической системы будет пропорционально частоте импульсов, а следовательно, и измеряемой мощности

$$I_{cp} = q \cdot 2f = 2CU_2f = 2CU_2mk'P = kU_2P.$$

Для получения устойчивых показаний применяется трансформатор 6, сглаживающий импульсы тока. Зарядный ток конденсаторов (конденсаторного приемника) i_1 , проходя по первичной обмотке трансформатора ω_1 , наводит э. д. с. во вторичной обмотке его ω_2 . Так как эта обмотка ω_2 замкнута на измерительный механизм 5,

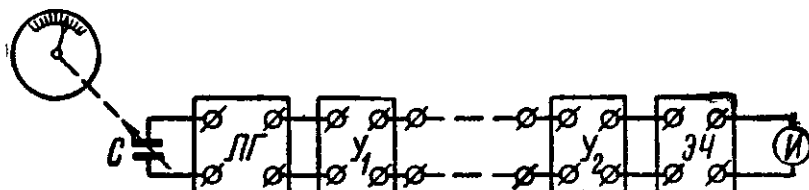


Рис. 18-7. Структурная схема частотной системы переменного тока.

то в его цепи пойдет ток, равный сумме токов i_1 и i_2 . При увеличении зарядного тока i_1 вторичный ток i_2 будет иметь направление, противоположное току i_1 . При уменьшении зарядного тока i_1 вторичный ток i_2 будет иметь направление, совпадающее с током i_1 .

Таким образом, кривая тока в измерительном механизме значительно сглаживается.

Из недостатков системы отметим наличие механического прерывателя в цепи конденсаторного приемника и тяжелые условия его работы. Так как механический прерыватель нежелателен, то он часто заменяется бесконтактным реле.

Точность измерения составляет 2,5—3% и не зависит от сопротивления линии связи и токов утечки.

Структурная схема частотной системы переменного тока дана на рис 18-7.

Ось подвижной части первичного измерительного прибора связана с подвижной частью конденсатора C (конденсаторного преобразователя).

Под действием измеряемой величины происходит поворот подвижной части первичного прибора и соответственно изменяется емкость C конденсатора.

Изменение этой емкости влечет за собой изменение частоты колебания лампового генератора ЛГ в соответствии с значением измеряемой величины. Переменный ток генератора усиливается усилителем $У_1$ и поступает в линию связи. На приемной стороне ток усиливается (усилитель $У_2$) и затем идет в схему электронного частотомера ЭЧ.

Измерительный прибор, показания которого определяются частотой тока, градуируется в значениях измеряемой величины.

Рассмотренная структурная схема является общей для большинства современных частотных схем переменного тока. Выполнения отдельных элементов структурной схемы могут быть весьма разнообразными.

Точность измерений этих систем $\pm 2,5\%$.

Частотная система переменного тока отличается от частотно-импульсной системы отсутствием электромеханических реле и контактных прерывателей.

18-5. СУММИРОВАНИЕ

Каждая телеизмерительная система должна давать возможность не только производить измерение какой-либо величины на расстоянии, но и производить суммирование измеряемых величин как на передающем конце линии (например, суммирование нагрузок отдельных генераторов станции), так и на приемном конце (например, суммирование нагрузок отдельных станций).

В зависимости от вспомогательных величин применяются суммирования вращающих моментов, токов, импульсов, напряжений, сопротивлений, емкостей и т. д.

Глава девятнадцатая

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

А. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Перед выполнением лабораторной работы необходимо провести предварительную подготовку, заключающуюся в ознакомлении с содержанием работы; в повторении теоретического материала, относящегося к работе; в выяснении цели и задачи, поставленных в работе; в ознакомлении с необходимыми материальными средствами для выполнения работы и последовательностью выполнения всех операций.

Результаты предварительной подготовки должны быть записаны в тетрадь лабораторных записей. Эта запись должна содержать: план выполнения работы, перечень необходимой аппаратуры, электрические схемы, расчет, формулы, таблицы и т. д.

Выполнение лабораторной работы заключается в ознакомлении с аппаратурой и записью основных ее технических данных, приближенном ($\pm 10 \div 20\%$) расчете токов и напряжений во всех участках цепи для максимального и минимального значений сопротивлений реостатов или других регулирующих устройств, в выборе по полученным данным необходимой аппаратуры или проверке по этим данным имеющейся аппаратуры.

После выбора аппаратуры необходимо составить план расположения ее на рабочем столе. При этом необходимо:

1) измерительные приборы, вспомогательные и регулирующие устройства располагать так, чтобы будущая схема соединений получилась наиболее простой и наглядной;

2) измерительные приборы и регулирующие устройства располагать так, чтобы работа с ними (отсчет, регулировка) была удобной, не требовала лишних движений или неудобных положений для наблюдателя;

3) измерительные приборы электродинамической и электромагнитной систем в большей мере, а приборы других систем в меньшей мере подверженные влиянию внешнего магнитного поля располагать так, чтобы дополнительные погрешности от магнитного поля были наименьшими.

Перед сборкой схемы необходимо ознакомиться с электрическими схемами приборов и аппаратов и со схемами их включения. При этом нужно выявить, какие зажимы приборов или аппаратов соответствуют тем или иным точкам электрической схемы и в какие положения должны быть поставлены движки реостатов и рукоятки регулирующих устройств.

Необходимо всегда стремиться к такому электрическому соединению элементов электрической цепи, чтобы цепь была максимально простой и наглядной, чтобы ее можно было проверить, не прикасаясь к ней руками.

Выполнению указанного требования способствует не только указанное ранее размещение приборов и аппаратов, но также и выбор соединительных проводов. Длина проводов должна соответствовать расстоянию между соединяемыми зажимами. Кроме того, рекомендуется главные (последовательные или рабочие) цепи соединить проводами одинакового (большого) сечения и одного цвета, а цепи вспомогательные (параллельные) соединить проводами другого, меньшего сечения и другого цвета.

При сборке схемы целесообразно сначала соединить главную последовательную цепь, затем — параллельные цепи.

Сборку схемы следует начинать от одного зажима источника питания и заканчивать на другом его зажиме.

Схему собирает один из членов бригады; другие члены бригады должны непрерывно контролировать его. Вторую схему собирает второй член бригады и т. д.

После сборки схемы она должна быть проверена остальными членами бригады.

Проверка должна производиться путем обхода сначала главного контура цепи, а затем и всех параллельных цепей.

При сложных схемах целесообразно производить дополнительную проверку всех узлов схемы.

В заключение проверки схемы необходимо убедиться в достаточной плотности всех зажимов, в правильности установки движков реостатов и рукояток других регулирующих устройств, а также в том, что указательные стрелки всех измерительных приборов стоят на нулевых делениях шкалы.

После проверки схемы членами бригады она обязательно должна быть проверена руководителем лабораторных работ, после чего с разрешения руководителя работ цепь может быть включена под напряжение.

При включении цепи под напряжение включающий самым внимательным образом должен следить за поведением амперметров и других измерительных приборов, а не смотреть на замыкаемый рубильник, как это часто бывает. Если при включении будет замечено ненормальное быстрое движение стрелки амперметра к концу шка-

лы, указывающее на большой ток в цепи, то рубильник нужно немедленно разомкнуть и, таким образом, цепь возможно быстрее отсоединить от источника питания или сети.

После замыкания рубильника рекомендуется произвести все необходимые регулировки и установить поочередно все возможные и необходимые режимы работы цепи, произведя предварительно только наблюдения (без записей), и только после этого вторично получить все нужные режимы работы, произведя наблюдения и записи в тетрадь рабочих записей.

Отсчеты по приборам необходимо производить со всем возможным вниманием и аккуратностью. Показания приборов записываются или в момент производства отсчета, или в момент, непосредственно следующий за отсчетом. Совершенно недопустимо производить записи наблюдений «на память», спустя некоторое время после наблюдений.

Работать в лаборатории следует крайне осторожно, продумывая предварительно, какое последствие вызывают каждый поступок, каждое движение, каждая регулировка.

После того как все необходимые наблюдения и расчеты будут произведены и записаны, они показываются руководителю, который в случае удовлетворительного выполнения работы дает разрешение на окончание работы.

После разборки схемы инвентарь работы сдается руководителю. При этом зажимы у всех приборов должны быть подвернуты до предела, соединительные провода аккуратно собраны и повешены на свои места.

Выполнение каждой лабораторной работы сопровождается записью, которая начинается в процессе предварительной (домашней) подготовки.

Рабочие записи лабораторных работ производятся в отдельной тетради.

Рабочие записи должны вестись со всей возможной тщательностью и аккуратностью. Они должны быть оформлены так, чтобы из них без всяких дополнительных разъяснений со стороны производившего запись можно было получить все необходимые данные, относящиеся к работе.

Рабочая запись должна содержать следующее:

I. Наименование работы, ее номер и дату выполнения

II. Перечень аппаратуры и ее технические данные. Например:

1. Амперметр магнитоэлектрической системы, $I_{\text{ном}}=5$ а, класс точности 1,5 № 37586.

2. Вольтметр магнитоэлектрической системы, $U_{\text{ном}}=15$ в, класс точности 1,5 № 78654.

3. Реостат с плавной регулировкой, $I_{\text{н}}=3,2$ а, $r_{\text{н}}=30$ ом.

4. Аккумулятор свинцовый, $E=4$ в, $I_{\text{р}}=10$ а, емкость $Q=60$ ач.

III. Электрическую схему.

IV. Расчет схемы и выбор аппаратуры.

V. Теоретические выкладки, расчетные формулы, замечания, вопросы, возникшие как в процессе подготовительной проработки, так и в процессе выполнения самой работы.

VI. Наблюдения и подсчеты, сведенные в таблицы.

VII. Кривые и графики, выполненные от руки.

При выполнении работы необходимо следить за соблюдением правил техники безопасности.

Категорически воспрещается касаться руками неизолированных проводов и зажимов, когда цепь находится под напряжением.

По каждой выполненной работе составляется отчет.

Отчеты выполняются на специальных бланках или листах клетчатой бумаги (33×21 см). В последнем случае с левой стороны листа оставляются поля шириной 3 см. Отчет выполняется чернилами с применением чертежных инструментов; выполнение должно быть тщательным, аккуратным.

Отчет должен содержать:

- 1) наименование работы и ее номер.
- 2) фамилию и инициалы учащегося, номер группы и дату выполнения;
- 3) перечень аппаратуры;
- 4) краткое описание работы;
- 5) схему соединения;
- 6) наблюдения и расчеты, записанные в таблицу;
- 7) кривые и графики, размеры которых должны быть не меньше 8×8 см;

графики должны быть построены на миллиметровой бумаге или бумаге с нанесенной на ней масштабной сеткой. При выборе масштаба иметь в виду, что число единиц в 1 см (или отрезке длины, принятом за единицу, например в стороне одной клетки клетчатой бумаги) должно выражаться числами: $1 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$ или $5 \cdot 10^n$, где n — целое число;

- 8) заключение по работе.

Отчет сдается при следующем за выполнением данной работы посещении лаборатории.

Б. СОСТАВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И ДОПУСТИМЫЕ УСЛОВИЯ ИХ РАБОТЫ

Каждая электрическая цепь состоит из отдельных элементов: 1) источника электрической энергии; 2) приемников электрической энергии; 3) регулирующих приборов или аппаратов (реостаты, реактивные катушки); 4) измерительных приборов; 5) коммутационных приборов и аппаратов (рубильники, переключатели); 6) соединительных проводов.

Источниками электрической энергии являются генераторы, аккумуляторы или гальванические элементы.

Генератор характеризуется: а) номинальным напряжением U_n ; б) номинальным током I_n ; в) номинальной мощностью P_n ; г) номинальной скоростью или номинальным числом оборотов в минуту; д) родом тока, а генераторы переменного тока, кроме того, номинальной частотой.

Аккумуляторы и гальванические элементы характеризуются: а) номинальной э. д. с. E_n ; б) разрядным (номинальным) током I_n ; в) емкостью, т. е. количеством электричества, которое можно получить от аккумулятора или элемента.

Приемниками электрической энергии являются двигатели, нагревательные приборы, лампы накаливания, сопротивления и т. д.

Двигатели характеризуются теми же величинами, что и генераторы.

Нагревательные приборы, лампы накаливания и другие приемники энергии характеризуются: номинальным напряжением, номинальным током или номинальной мощностью, а некоторые из них — родом тока и частотой.

Сопротивления и реостаты характеризуются величиной сопротивления и номинальным током.

Коммутационные приборы также характеризуются номинальными величинами тока и напряжения.

Номинальной величиной (тока, напряжения, мощности и т. д.) называется величина, указанная заводом на щитке соответствующей машины или аппарата.

Номинальная величина представляет собой наибольшее значение величины, на которую рассчитана и изготовлена машина или аппарат, исходя из условий допустимой электрической и механической прочности и допустимого нагревания при длительной работе. Таким образом, машину или аппарат нельзя нагружать выше номинальных величин во избежание повреждений или сокращения срока службы их.

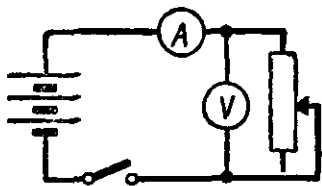


Рис. 19-1. Схема измерения сопротивления амперметром и вольтметром.

Наиболее часто применяемыми измерительными приборами являются амперметр, вольтметр, ваттметр. Они характеризуются системой, определяющей свойства прибора, классом точности и номинальными величинами тока, напряжения, мощности, под ко-

торыми понимают верхний предел измерения прибора или наибольшую величину, которой можно нагружать последовательную или параллельную цепь прибора.

Соединительные провода можно нагружать током, исходя из условий допустимого нагревания их током (1 мм²—11 а; 1,5 мм²—14 а; 2,5 мм²—20 а; 4 мм²—25 а; 6 мм²—31 а; 10 мм²—43 а) или из условий допустимого падения напряжения в них.

Перед монтажом каждой электрической цепи необходимо проверить возможность применения каждого прибора или аппарата в данной цепи, т. е. необходимо проверить, соответствуют ли номинальные величины отдельных машин, приборов и аппаратов одна другой, так как в противном случае отдельные элементы схемы могут оказаться в ненормальных условиях (одни могут быть перегружены, вследствие чего может произойти повреждение их, в то время как другие могут оказаться в условиях значительной недогрузки и не будут выполнять своего назначения).

Например, в цепи, показанной на рис. 19-1, при наличии аккумулятора с э. д. с. $E=6$ в и разрядным током $I_p=5$ а, реостата с сопротивлением $r_p=0,6$ ом и номинальным током $I_{нр}=3$ а, амперметра с номинальным током $I_{на}=5$ а и вольтметра с номинальным напряжением $U_n=65$ в при замыкании рубильника будет проходить ток

$$I = \frac{E}{r_p} = \frac{6}{0,6} = 10 \text{ а.}$$

Такой ток может вызвать повреждение аккумулятора, реостата и амперметра, так как номинальные токи их меньше тока, проходящего по цепи. Вольтметр же не измерит напряжения на зажимах

цепи, так как измеряемое напряжение значительно (в 11 раз) меньше номинального напряжения вольтметра, между тем как рабочая часть шкалы вольтметра (амперметра) обычно начинается с 20% номинального напряжения (тока).

По указанным выше соображениям в заданиях к лабораторным работам п. 1 требует ознакомления с приборами для производства работы и записи их номинальных величин, а п. 2 требует проверки возможности применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

Рассмотрим на нескольких примерах, как производится эта проверка.

Пример 19-1. Проверить возможность применения в работе с зеркальным гальванометром (§ 19-2, рис. 19-5) следующей аппаратуры:

1. Сухой элемент с э. д. с. $E=1,5$ в, с разрядным током $I_p=0,1$ а.

2. Сопротивление $r=100$ ом (рис. 19-5) с номинальным током $I_n=0,1$ а.

3. Реостат с сопротивлением $r_0=10$ ом с номинальным током $I_n=0,5$ а.

4. Милливольтметр магнитоэлектрической системы класса точности 1 на номинальное напряжение $U_n=150$ мв.

5. Проволочное сопротивление $r_1=2$ ом на номинальный ток $I_n=0,1$ а.

6. Магазин сопротивлений r_2 с катушками сопротивлений 100, 200, 300 и 400 ом на номинальный ток 0,1 а.

7. Магазин сопротивлений r_d с катушками сопротивлений 100, 200, 300, 400, 1 000, 2 000, 3 000 и 4 000 ом.

8. Зеркальный гальванометр типа 3-У физического института с постоянной по току $C_I=15 \cdot 10^{-10}$ а/мм, сопротивлением обмотки $r_r=500$ ом и внешним критическим сопротивлением $r_{кр\text{ вн}}=1\,200$ ом.

Проверка.

Так как разрядный ток элемента $I_p=0,1$ а, то сопротивление r_0+r должно быть не меньше

$$\frac{E}{I_p} = \frac{1,5 \text{ в}}{0,1 \text{ а}} = 15 \text{ ом.}$$

Имеющееся сопротивление (r_0+r) равно $10+100=110$ ом, что, очевидно, является приемлемым.

Напряжение на реостате r_0 должно быть не больше номинального напряжения милливольтметра, т. е. не больше 150 мв.

При имеющихся же сопротивлениях напряжение на реостате r_0 будет равно:

$$E \frac{r_0}{r_0+r} = 1,5 \frac{10}{10+100} = 0,14 \text{ в,}$$

что допустимо.

При отклонении светового зайчика на всю шкалу (100 мм) ток гальванометра

$$I_{г.н} = C_I 100 = 15 \cdot 10^{-10} \cdot 100 = 15 \cdot 10^{-8} \text{ а.}$$

Напряжение между точками цепи AB (рис. 19-5), т. е. напряжение на сопротивлении r_1 при $r_d = r_{кр.вн}$ будет иметь значение $U_{AB} = U_1 = I_{г.н} (r_г + r_{кр.вн}) = 15 \cdot 10^{-3} \cdot (500 + 1\,200) \approx 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ в.}$

Напряжение на двух последовательно соединенных сопротивлениях $r_1 + r_2$, равное напряжению на реостате r_6 , будет равно:

$$U = U_{1,2} = 0,14 \text{ в.}$$

Следовательно, напряжение на сопротивлении r_2 будет равно:

$$U_2 = U_{1,2} - U_1 = 0,14 - 2,5 \cdot 10^{-4} \approx 0,14 \text{ в.}$$

Так как напряжения на сопротивлениях r_1 и r_2 пропорциональны этим сопротивлениям, то можно написать: $r_1 : r_2 = U_1 : U_2$, откуда

$$r_2 = r_1 \frac{U_2}{U_1} = 2 \frac{0,14}{2,5 \cdot 10^{-4}} \approx 2 \cdot 530 \approx 1\,000 \text{ ом.}$$

Таким образом, магазин сопротивлений r_2 обладает достаточным сопротивлением.

Для выяснения влияния сопротивления контура гальванометра на характер движения рамки гальванометра достаточно изменять сопротивление r_d в границах от $\frac{r_{кр.вн}}{5}$ до $5 r_{кр.вн}$, т. е. от $1\,200:5 = 240 \text{ ом}$ до $1\,200 \cdot 5 = 6\,000 \text{ ом}$, что можно получить при имеющемся магазине сопротивлений.

Таким образом, имеющаяся аппаратура пригодна для выполнения работы.

Пример 19-2. Возможно ли при измерении сопротивлений методом амперметра и вольтметра (§ 9-4, рис. 9-13) совместное применение следующей аппаратуры;

- 1) аккумулятора с э. д. с. $E = 6 \text{ в}$ и разрядным током $I_p = 5 \text{ а}$;
- 2) реостата с $r = 0,5 \text{ ом}$ и $I_{нр} = 10 \text{ а}$;
- 3) вольтметра с $U_n = 5 \text{ в}$;
- 4) амперметра с $I_n = 5 \text{ а}$;
- 5) проволочного сопротивления $r_1 = 2 \text{ ом}$ с $I_{н1} = 6 \text{ а}$;
- 6) проволочного сопротивления $r_2 = 0,3 \text{ ом}$ с $I_{н2} = 5 \text{ а}$.

При соединении по схеме, данной на рис. 9-13, перечисленных выше аппаратов и приборов получим в цепи ток

$$I_1 = \frac{E}{r + r_1} = \frac{6}{0,5 + 2} = 2,4 \text{ а.}$$

Такой ток является допустимым, так как он меньше номинального тока каждого из элементов в цепи.

Напряжение на вольтметре будет:

$$U_V = I_1 r_1 = 2,4 \cdot 2 = 4,8 \text{ в,}$$

что также допустимо.

При включении в цепь сопротивления r_2 (взамен r_1) ток цепи

$$I_2 = \frac{E}{r + r_2} = \frac{6}{0,5 + 0,3} = 7,5 \text{ а},$$

что недопустимо, так как он превышает разрядный ток аккумулятора, номинальный ток амперметра и проволочного сопротивления.

Для того чтобы можно было получить ток в цепи, лежащий в границах рабочей части шкалы амперметра, необходимо взамен имеющегося реостата (п. 2) взять реостат с сопротивлением

$$r_p = \frac{E}{0,2I_n} - r_2 = \frac{6}{0,2 \cdot 5} - 0,3 = 5,7 \text{ ом}.$$

Номинальный ток этого реостата должен быть не меньше 5 а.

Пример 19-3. Проверить, возможно ли при поверке ваттметра по схеме, данной в § 19-7 на рис. 19-15, применение следующей аппаратуры:

1) ваттметра (поверяемого, индукционной системы, класса точности 1,5, $I_n = 5 \text{ а}$, $U_n = 120 \text{ в}$, $P_n = 600 \text{ вт}$;

2) ваттметра (образцового) электродинамической системы класса точности 0,5, $I_n = 5 \text{ а}$, $U_n = 150 \text{ в}$, $P_n = 750 \text{ вт}$;

3) амперметра электромагнитной системы класса точности 1,5, $I_n = 5 \text{ а}$;

4) вольтметра электромагнитной системы класса точности 1,5, $U_n = 140 \text{ в}$;

5) реостата $r'_2 = 3,5 \text{ ом}$, $I'_n = 5 \text{ а}$;

6) реостата $r''_2 = 0,5 \text{ ом}$, $I''_n = 10 \text{ а}$;

7) понижающего силового трансформатора с номинальным коэффициентом трансформации $k_n = \frac{120 \text{ в}}{4 \text{ в}}$, номинальной мощностью $S_n = 20 \text{ в а}$ и номинальной частотой $f_n = 50 \text{ гц}$;

8) реостата $r_1 = 400 \text{ ом}$ и $I_n = 0,5 \text{ а}$.

Проверка.

1. Образцовый ваттметр удовлетворяет требованиям § 19-4. Так как показания амперметра и вольтметра не используются при определении погрешностей, а служат только для контроля режима работы цепи, то точность их является достаточной.

2. Проверка возможности применения аппаратуры для последовательной цепи.

Пользуясь табл. 3-4, находим сопротивления последовательных обмоток ваттметра $r_{w1} = 0,24 \text{ ом}$ и сопротивление амперметра $r_A = 0,1 \text{ ом}$.

Приняв сопротивления соединительных проводов и сопротивление контактов для каждого прибора равным 0,1 ом, получим сопротивление цепи $r_{п.ц}$, подключенной к вторичной обмотке трансформатора, при выведенных сопротивлениях реостатов:

$$r_{п.ц} = (0,24 \cdot 2) + 0,1 + (0,1 \cdot 3) \approx 0,9 \text{ ом}.$$

Так как номинальный ток ваттметра $I_n = 5$ а, то необходимое напряжение на вторичной обмотке трансформатора должно быть не меньше

$$U_{н.т} = r_{н.т} I_n = 0,9 \cdot 5 \approx 5 \text{ в.}$$

Номинальная мощность трансформатора

$$S_{н.т} = U_{н.т} I_n = 5 \cdot 5 = 25 \text{ в.а.}$$

Очевидно, имеющийся трансформатор не подходит для нашей работы и должен быть заменен другим с номинальной мощностью

$$S'_{н.т} \geq 25 \text{ в.а.}$$

и номинальным коэффициентом трансформации

$$k'_n = \frac{120 \text{ в.}}{5 \text{ а.}}$$

Так как первая точка шкалы поверяемого ваттметра соответствует примерно 10% номинальной мощности ваттметра (50 вт), что соответствует току в последовательной цепи $50 : 120 \approx 0,4$ а, то сопротивление реостата должно быть не меньше

$$r = \frac{5}{0,4} \approx 12 \text{ ом.}$$

Таким образом, имеющиеся реостаты с сопротивлениями $r'_2 + r''_2 = 4$ ом также не подходят для работы и должны быть заменены реостатами с сопротивлениями

$$r'_2 = 10 \text{ ом} \quad \text{и} \quad r''_2 = 2 \text{ ом.}$$

3. Проверка возможности применения аппаратуры для параллельной цепи.

По табл. 3-4 находим мощность вольтметра и параллельных цепей ваттметра:

$$P_{\text{пар.ц}} = 6 + 5 + 10 \approx 20 \text{ в.а.}$$

Ток, потребляемый параллельными цепями,

$$I_{\text{пар.ц}} = \frac{20}{110} = 0,2 \text{ а.}$$

Сопротивление параллельных цепей

$$r_{\text{пар.ц}} = \frac{120}{0,2} = 600 \text{ ом.}$$

Реостат для регулирования напряжения в параллельных цепях приборов следует брать с сопротивлением того же порядка, что и сопротивление цепей, так как в реостате с значительно меньшим сопротивлением будет развиваться большая мощность, а реостат с сопротивлением, значительно большим, не обеспечит плавной ре-

гулировки напряжения. Имеющийся в нашем распоряжении реостат с сопротивлением $r_1 = 400 \text{ ом}$ вполне пригоден для нашего случая.

Так как по части реостата проходит ток, равный сумме тока, обусловленного сопротивлением реостата, и тока параллельных цепей измерительных приборов, то реостат должен быть рассчитан на ток

$$I_p = \frac{U}{r_1} + I_{\text{пар.ц}} = \frac{120}{400} + 0,2 = 0,3 + 0,2 = 0,5 \text{ а.}$$

По величине тока имеющийся реостат r_1 также является приемлемым.

В. СОДЕРЖАНИЕ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

19-1. СТРЕЛОЧНЫЙ ГАЛЬВАНОМЕТР (РАБОТА 1)

а) Определение постоянной гальванометра

Для определения постоянной по току пользуются схемой, данной на рис. 19-2.

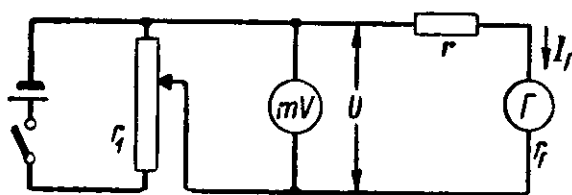


Рис. 19-2. Схема градуировки стрелочного гальванометра.

Она может быть определена по формуле

$$C_I = \frac{I_g}{n} = \frac{U}{(r_g + r)n},$$

где U — показание гальванометра;

r_g — сопротивление гальванометра;

r — сопротивление магазина сопротивлений;

n — число делений шкалы, на которое отклоняется стрелка гальванометра.

Задание 1

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему (рис. 19-2) и показать ее для проверки руководителю.

4. При двух различных значениях напряжения определить постоянную C_I .

5. Определить номинальный ток гальванометра по формуле

$$I_{г.н} = C_I N,$$

где N — полное число делений шкалы.

6. Определить чувствительность гальванометра к току $S_I = 1/C_I$.
Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-1.

Таблица 19-1

№ наблю- дений	Дано	Наблюдения			Подсчеты			Примеча- ние
	$r_{г}$	U	r	n	C_I	$I_{г.н}$	S_I	
	ом	в	ом	дел	мка/дел	мка	дел/мка	

б) Шунтирование гальванометра

При измерении токов, больших $I_{г.н}$, применяют шунт. Сопротивление шунта находим по формуле (5-3).

Шунтирующий множитель находим по формуле (5-2).

Задание 2

1. Подсчитать сопротивление шунта $r_{ш1}$, если необходимо предел измерения тока расширить в 40 раз.

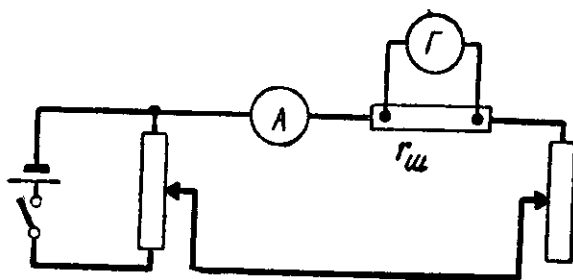


Рис. 19-3. Схема градуировки гальванометра с шунтом.

2. Определить постоянную по току шунтированного гальванометра.

3. Собрать схему (рис. 19-3). Взять шунт найденной величины и при двух различных значениях тока проверить правильность найденных соотношений.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-2.

4. Подсчитать, во сколько раз расширяется предел измерения тока гальванометром, если его шунтировать сопротивлением $r_{ш2} = 1$ ом. Подсчитать новую постоянную по току шунтированного гальванометра и подсчет проверить опытом подобно п. 3 задания 2.

Наблюдения записать в табл. 19-3.

• **Таблица 19-2**

[illegible]

Таблица 19-3

[illegible]

в) Использование гальванометра для измерения напряжения

Напряжение на зажимах гальванометра

$$U_{\Gamma} = I_{\Gamma} r_{\Gamma} = C_{\Gamma} r_{\Gamma} n = C_{\Gamma} n,$$

где $C_U = C_{Ir}$ — постоянная гальванометра по напряжению. Номинальное напряжение гальванометра $U_{г.н} = C_U N$,

При измерении напряжений, больших $U_{г.н}$, применяют добавочное сопротивление.

Добавочное сопротивление находим по формуле (5-7).

Множитель добавочного сопротивления находим по формуле (5-7),

Задание 3

1. Определить постоянную гальванометра по напряжению.
 2. Определить номинальное напряжение гальванометра.
 3. Подсчитать величину добавочного сопротивления для расширения предела измерения в 50 раз.
 4. Подсчитать постоянную гальванометра по напряжению при работе гальванометра с добавочным сопротивлением.
 5. Собрать схему по рис. 19-4, взять добавочное сопротивление найденной величины и проверить найденные соотношения.
- Наблюдения записать в табл. 19-4.

Таблица 19-4

№ наблюдений	Подсчеты		Дано	Подсчеты		Наблюдения		Подсчеты	Примечание
	C_U	$U_{г. н}$	P_1	$r_{д1}$	$C'_U = C_U P_1$	n_1	U_1	$C'_U = \frac{U_1}{n_1}$	
	мкв/дел	в	—	ом	мкв/дел	дел.	мкв	мкв/дел	

6. Подсчитать, во сколько раз расширится предел измерения напряжения гальванометра, если применить добавочное сопротивление $r_d = 800 \text{ ом}$.

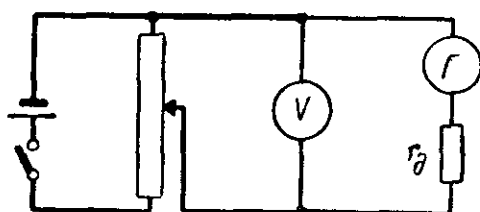


Рис. 19-4. Схема градуировки гальванометра с добавочным сопротивлением.

7. Подсчитать постоянную по напряжению для гальванометра, работающего с добавочным сопротивлением.

Подсчеты проверить опытом.

Наблюдения записать в табл. 19-5.

Таблица 19-5

№ наблюдений	Дано			Подсчеты		Наблюдения		Подсчеты	Примечание
	C_U	$r_{г}$	$r_{д1}$	P_2	$C''_U = C_U P_2$	n_2	U_2	$C''_U = \frac{U_2}{n_2}$	
	мкв/дел	ом	ом	—	мкв/дел	дел.	мкв	мкв/дел	

19-2. ЗЕРКАЛЬНЫЙ ГАЛЬВАНОМЕТР (РАБОТА 2)

а) Определение критического сопротивления гальванометра

Для определения критического сопротивления гальванометра пользуются схемой, данной на рис. 19-5, где Γ — зеркальный гальванометр; r_d , r_1 и r_2 — магазины сопротивлений; r_0 — трехконтактный реостат; r — постоянное сопротивление; E — элемент; mV — милливольтметр; K_1 и K_2 — однополюсные рубильники.

После установки оптического приспособления для производства зеркального отсчета и получения светового зайчика на нулевом делении шкалы при значении добавочного сопротивления r_d , равного примерно одной десятой доле значения критического сопротивления гальванометра, и положении движка реостата у зажима b замыкаем рубильники k_1 и k_2 . Перемещением движка b заставляем подвижную часть гальванометра отклониться на угол, соответствующий перемещению светового зайчика до половины шкалы. После

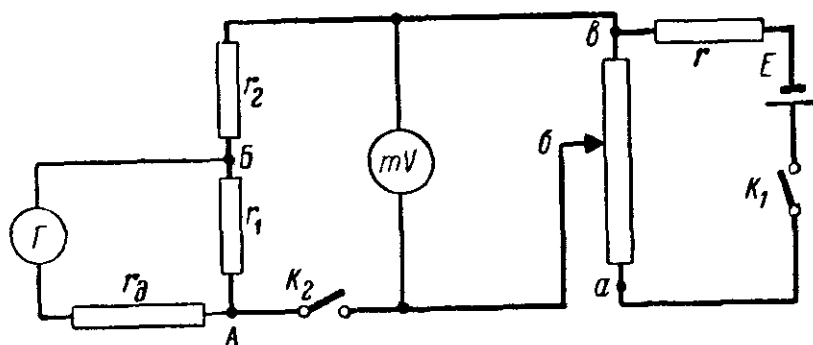


Рис. 19-5. Схема градуировки зеркального гальванометра.

этого размыкаем рубильник k_2 и замечаем характер движения подвижной части. Затем такие же наблюдения производим, увеличивая r_d .

При некотором определенном сопротивлении $r_d = r'_d$ движение подвижной части гальванометра будет еще аperiодическим, а при сопротивлении r_d , большем r'_d , движение ее будет уже колебательным.

Гальванометр, работающий в таком пограничном режиме, носит название критически успокоенного, а сопротивление цепи гальванометра $r_r + r'_d + r_1 = r_{kp}$ — полного критического сопротивления гальванометра.

Величина $r_{kp} - r_r = r'_d + r_1 = r_{кв}$ носит название внешнего критического сопротивления.

Задание 1

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему (рис. 19-5) и показать ее для проверки руководителю.

4. Установить и отрегулировать приспособление для зеркального отсчета так, чтобы световой зайчик был резко виден на нулевом делении шкалы.

5. Определить критическое сопротивление гальванометра.

Примечание. Работать с гальванометром следует крайне осторожно во избежание его повреждения. Без проверки руководителем схемы под напряжение не включать.

б) Определение постоянной гальванометра

Для определения постоянной гальванометра по току пользуются схемой, данной на рис. 19-5.

При критически успокоенном гальванометре, перемещая движок b , получить различные отклонения гальванометра (отклонение светового зайчика на шкале $n=10, 30, 50, 70, 90, 110, 130, 150$ мм), замечая при этом показания милливольтметра.

Величина тока гальванометра может быть определена, исходя из следующих соотношений.

Напряжение между точками AB

$$U_{AB} = I_{\Gamma} (r_{\Gamma} + r_{\Delta}) = I \frac{(r_{\Gamma} + r_{\Delta}) r_1}{r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1},$$

откуда

$$I_{\Gamma} = I \frac{(r_{\Gamma} + r_{\Delta}) r_1}{(r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1)(r_{\Gamma} + r_{\Delta})} = I \frac{r_1}{r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1}.$$

Ток

$$I = \frac{U}{r_2 + \frac{(r_{\Gamma} + r_{\Delta}) r_1}{r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1}}.$$

Подставляя значения тока I в предыдущее равенство, получаем

$$\begin{aligned} I_{\Gamma} &= \frac{U}{r_2 + \frac{(r_{\Gamma} + r_{\Delta}) r_1}{r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1}} \cdot \frac{r_1}{r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1} = \\ &= U \frac{r_1}{\frac{r_2 (r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1) + (r_{\Gamma} + r_{\Delta}) r_1}{r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1} (r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1)} = \\ &= U \frac{r_1}{r_2 (r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1) + r_1 (r_{\Gamma} + r_{\Delta})}. \end{aligned}$$

Величина постоянной гальванометра по току

$$C_I = \frac{I_{\Gamma}}{n} = \frac{U}{n} \cdot \frac{r_1}{r_2 (r_{\Gamma} + r_{\Delta} + r_1) + r_1 (r_{\Gamma} + r_{\Delta})}, \quad (19-1)$$

где U — показание милливольтметра;

n — число миллиметров шкалы, на которое отклоняется световой зайчик.

Задание 2

1. Определить постоянную гальванометра по току при различных значениях тока (при различных значениях n).

2. На основании полученных данных построить кривую зависимости между током гальванометра и числом делений, на которое отклоняется световой зайчик, $I_{\Gamma} = f(n)$.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-6.

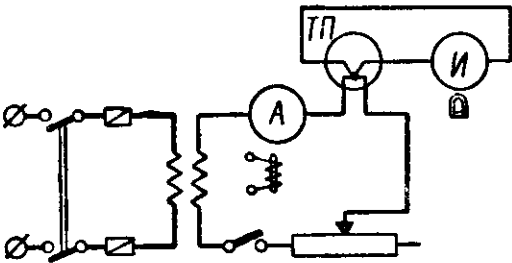
Таблица 19-6

№ наблюдений	U	n	C_I	r_r	r_d	r_1	r_o	$r_{к.в}$	$r_{к.п}$	Примечание
	в	дел	мкА/дел	ом	ом	ом	ом	ом	ом	

19-3. ГРАДУИРОВКА ПРИБОРА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ И ВЫПРЯМИТЕЛЕМ (РАБОТА 3)

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

Рис. 19-6. Схема градуировки прибора магнитоэлектрической системы с термопреобразователем.



2. Проверить возможность применения имеющийся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему (рис. 19-6) и показать ее для проверки руководителю

4. Изменяя реостатом ток цепи от нуля до номинального и от номинального до нуля, при различных значениях его, соответствующих основным точкам шкалы прибора магнитоэлектрической системы, соединенного с термопреобразователем, отсчитать показания приборов и записать их в табл. 19-7.

Таблица 19-7

№ наблюдений	I	n	Примечание
	а	дел.	

5. По полученным данным построить градуировочную кривую $I_{э м} = f(n)$.

6. Собрать схему (рис. 19-7) и показать ее для проверки руководителю.

7. Изменяя реостатом ток цепи от нуля до номинального и от номинального до нуля при различных значениях его, соответствующих основным точкам шкалы прибора магнитоэлектрической системы, отсчитать показания приборов и записать их в табл. 19-8.

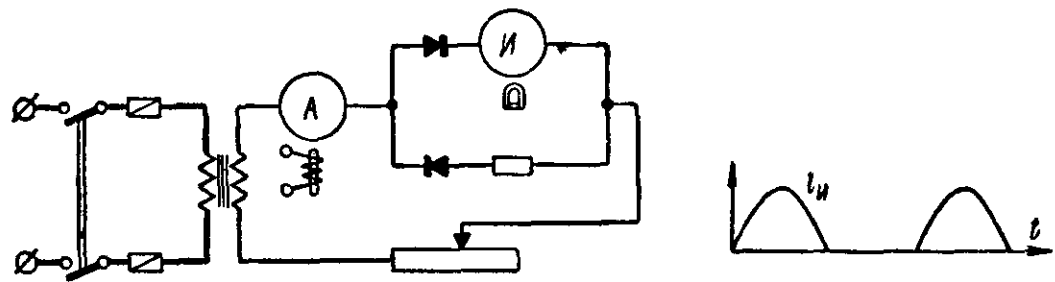


Рис. 19-7. Схема градуировки прибора магнитоэлектрической системы с однополупериодным выпрямителем.

8. По полученным данным построить градуировочную кривую $I_{э.м} = f(I_{м.э})$.

9. Собрать схему (рис. 19-8) и показать ее для проверки руководителю.

10. Повторить измерения, указанные в п. 7, наблюдения записать в табл. 19-8.

11. По полученным данным построить кривую $I_{э.м} = f(I_{м.э})$.

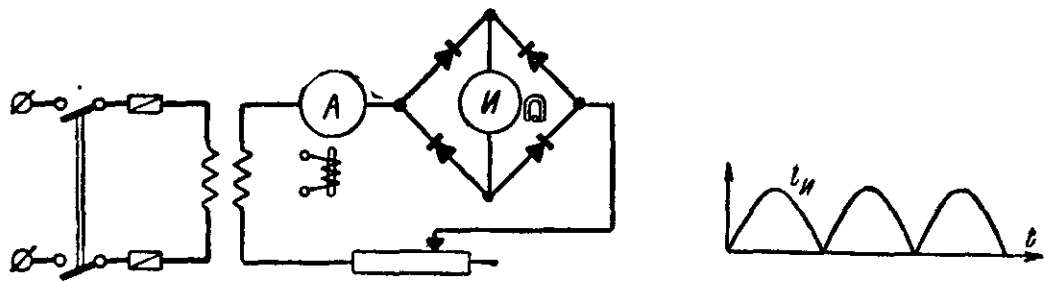


Рис. 19-8. Схема градуировки прибора магнитоэлектрической системы с двухполупериодным выпрямителем.

Таблица 19-8

№ наблюдений	$I_{э.м}$	$I_{м.э}$	$k = \frac{I_{э.м}}{I_{м.э}}$	Примечание
	<i>a</i>	<i>a</i>	—	

19-4. УКАЗАНИЯ, ОТНОСЯЩИЕСЯ К ПОВЕРКЕ АМПЕРМЕТРОВ, ВОЛЬТМЕТРОВ И ВАТТМЕТРОВ

При эксплуатации прибора могут иметь место повреждения, изменения и износ отдельных частей прибора, что приводит к нарушению нормальной работы прибора и появлению недопустимых погрешностей. Это делает необходимым производить поверку приборов не только при выпуске их с заводов, но и периодически во время эксплуатации их.

Периодические поверки приборов производятся: 1) органами Комитета по делам мер и измерительных приборов — Госповерки и 2) учреждениями и предприятиями, эксплуатирующими приборы.

Поверка прибора состоит из четырех частей: 1) внешнего осмотра прибора; 2) выбора образцового прибора и подготовки к поверке; 3) поверки показаний прибора и 4) документального оформления поверки.

1. Внешний осмотр прибора имеет целью выяснить дефекты, могущие препятствовать дальнейшему применению прибора, например: повреждение стекла, корректора, стрелки или наличие отсоединившихся деталей и т. д.

2. Выбор образцового прибора производится: а) по роду тока; б) по его номинальной величине; в) по классу точности.

Род тока, на котором производится поверка, определяется системой поверяемого прибора, его конструкцией, свойствами и назначением. Например: приборы магнитоэлектрической системы поверяются только на постоянном токе; приборы индукционной системы — только на переменном токе, приборы термоэлектрической и электромагнитной систем — или на постоянном, или на переменном токе — в зависимости от их конструктивных особенностей (конструкция термопреобразователя — у первых, род стали сердечника и его конструкция — у вторых).

При выборе рода тока следует учитывать имеющийся на шкале поверяемого прибора знак рода тока.

При выборе образцового прибора по его номинальной величине необходимо, чтобы его верхний предел измерения был равен или близок верхнему пределу измерения поверяемого прибора; в противном случае относительные (но не приведенные) погрешности образцового прибора могут быть недопустимо велики.

При выборе образцового прибора по классу точности необходимо, чтобы допустимая (приведенная) погрешность его была по крайней мере в 3 раза меньше допустимой (приведенной) погрешности поверяемого прибора.

Таким образом, поверка приборов классов точности 1,5 и 2,5 производится по приборам класса точности 0,5; поверка приборов класса точности 1 — по приборам класса 0,2; поверка приборов класса точности 0,5 — по приборам класса 0,1, а поверка приборов классов 0,1 и 0,2 может производиться только на компенсаторах, которые обеспечивают точность 0,02—0,03%.

При применении компенсаторов для поверки приборов необходимо пользоваться нормальными элементами класса точности II.

Поверка технических приборов производится путем сравнения показаний их с показаниями образцовых приборов.

Схема соединений для поверки технических приборов должна быть такой, чтобы при поверке ток поверяемого амперметра был

в точности равен току образцового амперметра, напряжение на поверяемом вольтметре было в точности равно напряжению на образцовом вольтметре, а при проверке ваттметра ток последовательной обмотки поверяемого ваттметра был бы равен току соответствующей обмотки образцового ваттметра и напряжение на параллельной цепи поверяемого ваттметра было равно напряжению на соответствующей цепи образцового ваттметра.

Кроме того, схема проверки и применяемая аппаратура должны обеспечить: 1) возможность плавной регулировки показаний приборов на протяжении всей рабочей части шкалы; 2) наименьший расход энергии при проверке; 3) удобство работы.

После сборки схемы рукоятки регулирующих устройств устанавливаются в положения, соответствующие наименьшим показаниям приборов (наименьшим значениям токов и напряжений).

Проверке подлежат все основные (оцифрованные) деления шкалы. Поэтому перед замыканием рубильника стрелки приборов устанавливаются на нулевые деления шкал, что и отмечают в протоколе проверки как первое наблюдение. После этого схему включают под напряжение и при помощи регулирующих устройств изменяют ток или напряжение так, чтобы стрелка поверяемого прибора последовательно устанавливалась над каждым основным делением шкалы; при этом производят запись показаний обоих приборов. Регулировку следует вести так, чтобы показания поверяемого прибора сначала от нуля постепенно увеличивались до номинального значения, а затем плавно уменьшались до нуля. После размыкания рубильника производятся определение положения стрелок приборов и запись последнего наблюдения. Если после размыкания рубильника стрелка поверяемого прибора не дойдет до нуля, то это укажет на наличие заметной погрешности от трения.

Определение погрешностей и поправок производится по формулам, приведенным в § 1-2.

Проверка приборов (лабораторных) сопровождается оформлением ее протоколом проверки, в котором должны быть даны таблица и кривая поправок.

19-5. ПОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО АМПЕРМЕТРА (РАБОТА 4)

Для проверки амперметров можно применять различные схемы (рис. 19-9, а, б и в). Применение двух реостатов, отношение сопротивлений которых $r_1/r_2 \approx 4-8$, обеспечивает возможность грубой и тонкой регулировки тока цепи. Применение при переменном токе понижающего нагрузочного трансформатора уменьшает затраты энергии при проверке и дает возможность применять менее громоздкие, а следовательно, более дешевые и удобные для работы реостаты. Схема, данная на рис. 19-9, в, особенно удобна при проверке амперметров на большие токи, так как позволяет применять реостаты на токи, значительно меньшие номинального тока поверяемого прибора.

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, и записать систему приборов, их номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему и показать ее для проверки руководителю.

4. После замыкания рубильника при различных значениях тока произвести запись показаний амперметров и определить для дан-

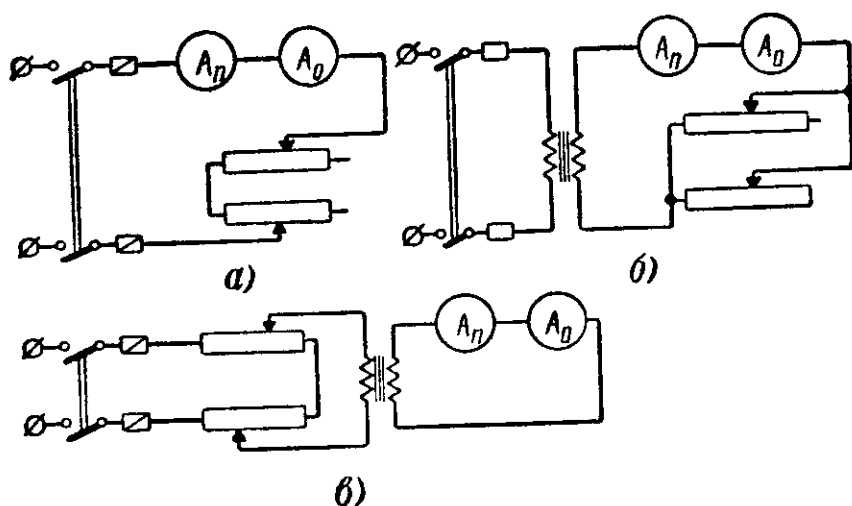


Рис. 19-9. Схемы для поверки технического амперметра.

а — с применением двух реостатов; б — с применением трансформатора и двух реостатов во вторичной цепи, в — с применением трансформатора и двух реостатов в первичной цепи.

ного поверяемого амперметра абсолютные и приведенные погрешности и абсолютные поправки.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-9.

5. Дать заключение о поверяемом амперметре.

Таблица 19-9

№ наблюдений	Показание приборов					Погрешности		Поправки	Примечание
	поверяемого	образцового				абсолютные	приведенные		
		ход вверх		ход вниз					
		дел.	а	дел	а	а	а		
а									

19-6. ПОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО ВОЛЬТМЕТРА (РАБОТА 5)

Для поверки вольтметра можно применять схему соединения, данную на рис. 19-10, в которой регулировка напряжения производится при помощи реостатов, или схему, данную на рис. 19-11, в которой регулировка напряжения производится при помощи лабораторного автотрансформатора типа ЛАТР, изготовляемого Московским электромеханическим заводом.

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их систему, номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

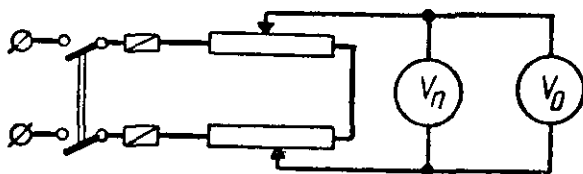


Рис. 19-10. Схема для поверки технического вольтметра с применением двух реостатов.

3. Собрать схему и показать ее для проверки руководителю.

4. После замыкания рубильника при различных значениях напряжений произвести запись показаний вольтметра и определить аб-

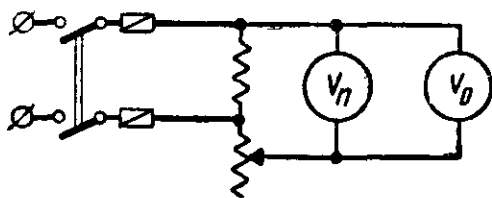


Рис. 19-11. Схемы для проверки технического вольтметра с применением автотрансформатора.

солютные и приведенные погрешности и поправки для поверяемого вольтметра.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-10.

5. Дать заключение о поверяемом вольтметре

Таблица 19-10

[illegible]

19-7. ПОВЕРКА ТЕХНИЧЕСКОГО ВАТТМЕТРА (РАБОТА 6)

Для поверки технического ваттметра путем сравнения показаний его с показаниями образцовых приборов можно пользоваться одной из схем, данных на рис. 19-12—19-16.

На рис. 19-12 дана простейшая схема проверки ваттметра, допускающая только регулировку тока.

На рис. 19-13 дана схема проверки, допускающая независимую регулировку тока и напряжения.

На рис. 19-14 дана схема проверки, допускающая независимую регулировку тока и напряжения. В этой схеме питание последова-

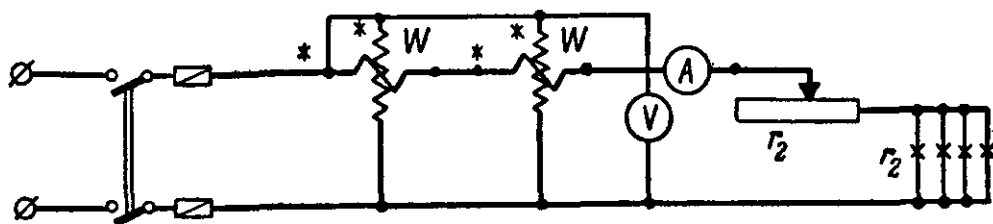


Рис. 19-12. Схема для проверки технического ваттметра с регулировкой тока.

тельных обмоток ваттметра производится от одного источника энергии с малым напряжением, а параллельные цепи ваттметров пи-

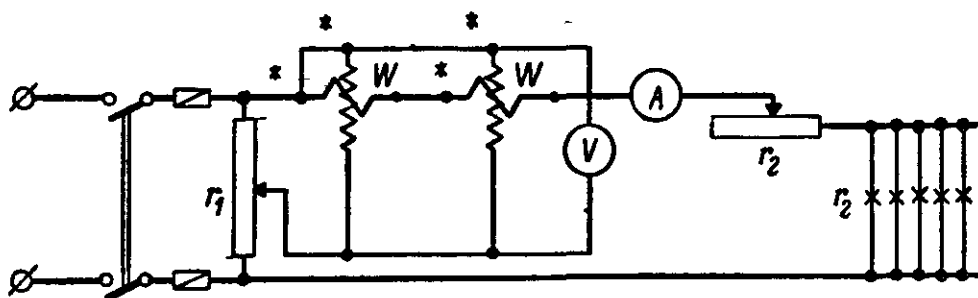


Рис. 19-13. Схема для проверки технического ваттметра с регулировкой тока и напряжения.

таются от второго источника энергии с напряжением, соответствующим номинальному напряжению испытуемого ваттметра (способ разделенных цепей).

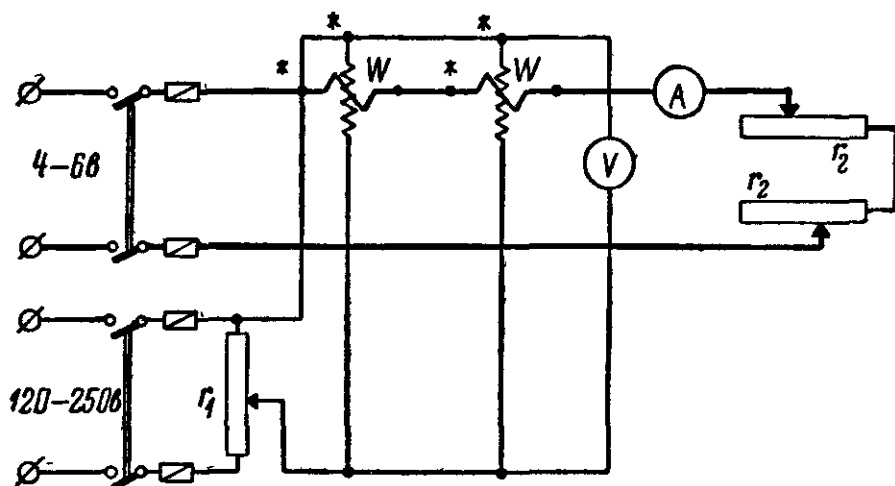


Рис. 19-14. Схема для проверки технического ваттметра с питанием цепей от разных источников.

При таком питании цепей от отдельных источников, с одной стороны, уменьшается мощность, с другой стороны, удается освободиться от громоздких нагрузочных реостатов.

На рис. 19-15,а дана схема, дающая возможность произвести поверку ваттметров при $\cos \varphi = 1$ и $\cos \varphi = 0,5$ ($\angle \varphi = 60^\circ$), что дости-

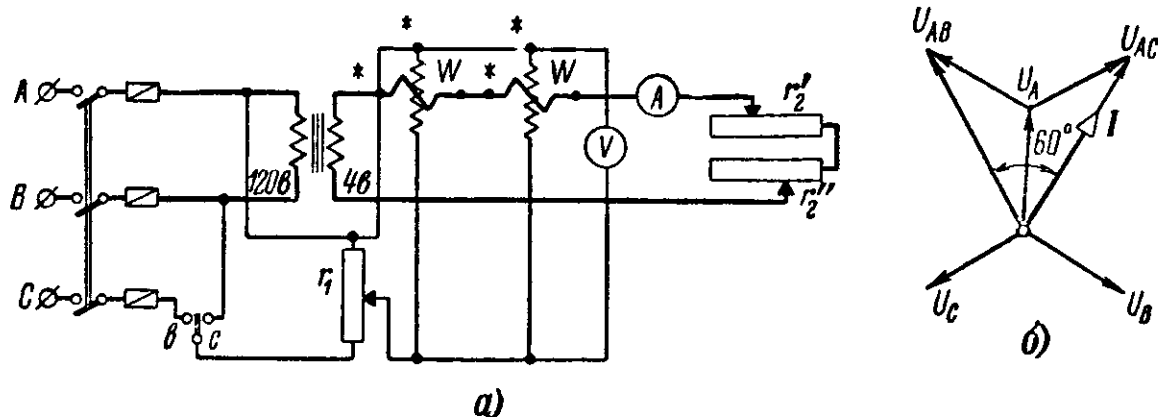


Рис. 19-15. Схема для проверки технического ваттметра с питанием от сети трехфазного тока (а). Векторная диаграмма (б).

гается переключением параллельных цепей с одного линейного напряжения U_{AC} на другое линейное напряжение U_{AB} (рис. 19-15,б).

На рис. 19-16 дана схема для проверки ваттметра, допускающая

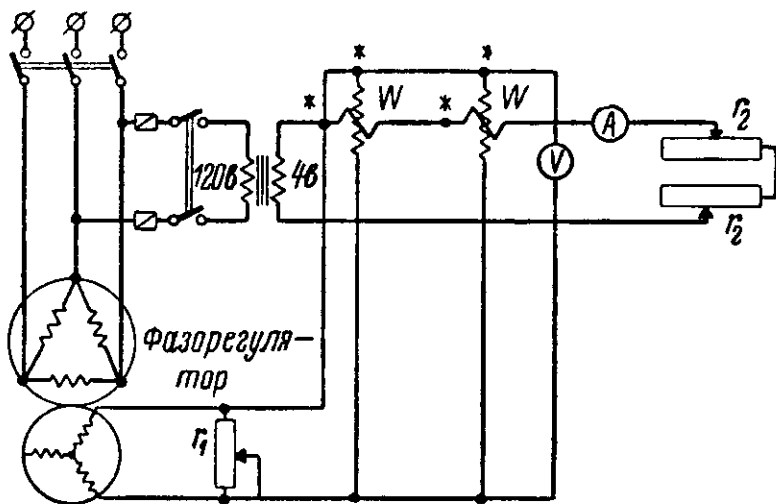


Рис. 19-16. Схема для проверки технического ваттметра при питании параллельных цепей от фазорегулятора.

независимую регулировку тока, напряжения и угла сдвига между током и напряжением в пределах $\pm 90^\circ$. Последняя регулировка производится поворотом ротора фазорегулятора.

Перед включением ваттметра в цепь необходимо выяснить, какие зажимы принадлежат последовательным, а какие параллельным цепям ваттметра, а также найти генераторные зажимы обмоток. Определение зажимов производится способом, рассмотренным в § 11-6.

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы. Записать номинальные величины приборов, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему и показать ее для проверки руководителю.

4. При различных нагрузках произвести поверку испытуемого ваттметра:

а) при номинальном (неизменном) напряжении;

б) при номинальном (неизменном) токе.

5. Для обоих случаев п. 4 определить абсолютные погрешности и поправки и приведенные погрешности.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-11.

6. Дать заключение о поверяемом ваттметре.

Таблица 19-11

№ наблюдений	Показания приборов						Погрешности		Поправки	Примечание
	вольтметра	амперметра	ваттметра			абсолютные	приведенные			
			испыт. уемого	образцового						
				ход вверх	ход вниз			среднее		
в	а	вт	дел.	дел	вт	вт	%	вт		

19-8. ПОВЕРКА ОБРАЗЦОВОГО АМПЕРМЕТРА (РАБОТА 7)

Поверку амперметров классов точности 0,1; 0,2; 0,5 магнито-электрической, электродинамической и электромагнитной систем можно произвести на одном из компенсаторов постоянного тока, например на компенсаторе ППТВ-1 (рис. 6-4).

Поверка заключается в сравнении показаний поверяемого амперметра с током, идущим по образцовой катушке сопротивления, соединенной последовательно с амперметром (рис. 6-7). Измеряя компенсатором падение напряжения на образцовой катушке и деля его на сопротивление катушки, находим действительную величину тока катушки, а следовательно, и амперметра. Разность между показанием амперметра и найденным действительным значением тока, как известно, и дает абсолютную погрешность амперметра.

Величина сопротивления катушки, необходимой для поверки, определяется наибольшим значением напряжения, которое может быть измерено компенсатором (в нашем случае 1,2 в), деленным на номинальный ток поверяемого амперметра, т. е. сопротивление катушки

$$r_0 \leq \frac{U_{нн}}{I_{на}}.$$

Задание

1. Для амперметра, данного для поверки, определить сопротивление образцово́й катушки.
2. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, и записать их номинальные величины, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.
3. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.
4. Соединить приборы по схеме рис. 6-7 и показать ее для проверки руководителю.
5. Измерить температуру, определить э. д. с. нормального элемента при найденной температуре и установить соответствующее сопротивление в магазине.
6. Установить рабочий ток в главной цепи компенсатора равным 0,1 ма.
7. Произвести поверку всех основных делений шкалы поверяемого амперметра.
8. Определить абсолютные погрешности, поправки и приведенные погрешности.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-12.

Таблица 19-12

[illegible]

9. Построить кривую поправок.
10. Дать заключение о поверяемом амперметре.

19-9. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ТОКА (РАБОТА 8)

Погрешности измерительных трансформаторов класса 1 в коэффициенте трансформации обычно не превышает 1—2%, погрешность угловая 80—120'. Погрешности измерительных трансформаторов класса 0,5 еще меньше. Определение погрешностей такой малой величины требует применения методов, обеспечивающих высокую степень точности измерений. Такими методами являются нулевые и дифференциальные методы. Но так как эти методы сложны и требуют применения специальной аппаратуры, то применение их ограничено.

Здесь мы рассмотрим упрощенный способ определения погрешности коэффициента трансформации путем непосредственного изме-

рения первичных и вторичных величин. Этот способ наиболее прост, но зато даваемые им результаты не могут претендовать на большую точность.

Для определения погрешности коэффициента трансформации трансформатора тока можно воспользоваться схемой, данной на рис. 19-17. На схеме приняты обозначения: CT — силовой понижающий трансформатор; TT — проверяемый трансформатор тока; r_2 —

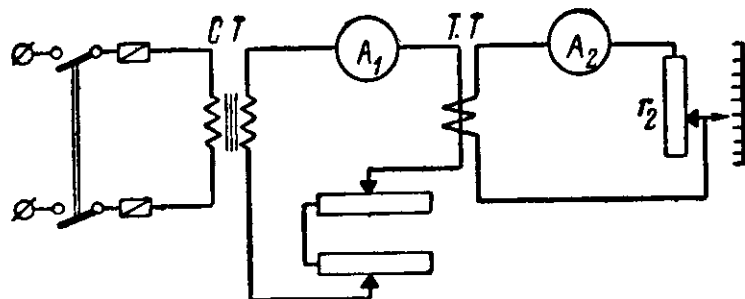


Рис. 19-17. Схема проверки трансформатора тока.

градуированный реостат, дающий возможность устанавливать различные сопротивления вторичной, внешней цепи трансформатора тока.

Измерив токи I_1 и I_2 , можно определить действительный коэффициент трансформации $k = \frac{I_1}{I_2}$.

Погрешность в коэффициенте трансформации

$$\gamma_k = \frac{k_n - k}{k} 100\%.$$

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы. Записать их номинальные величины, системы, классы точности, заводские номера и другие технические данные, а также заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему и показать ее для проверки руководителю.

4. При различных значениях первичного тока в пределах 20—100% номинального при номинальном сопротивлении вторичной цепи трансформатора определить коэффициент трансформации и погрешность в коэффициенте трансформации.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-13.

5. При первичном токе 50% номинального и сопротивлении вторичной цепи трансформатора тока, составляющем 20, 50, 100, 150 и 200% номинального, определить коэффициенты трансформации и погрешности в коэффициенте трансформации.

6. По полученным данным построить кривые погрешности трансформатора:

а) в зависимости от тока $\gamma_k = f(I_1)$ при $z_2 = \text{const}$;

Таблица 19-13

№ наблюдений	I_1	I_2	$k = \frac{I_1}{I_2}$	k_n	Погрешность γ_k	Сопротивление вторичной внешней цепи	Примечание
	a	a	—	—	%	ом	

б) в зависимости от сопротивления вторичной цепи $\gamma_k = f(z_2)$ при $I_1 = \text{const}$.

Более точное определение погрешности в коэффициенте трансформации и определение угловой погрешности трансформатора тока можно произвести при помощи дифференциального прибора (например, типа АТТ). На рис. 19-18,а дана принципиальная схема одного из таких приборов.

Первичные обмотки поверяемого T_x и образцового T_o трансформаторов соединены последовательно, и по ним проходит ток I_1 .

Последовательно с вторичной обмоткой образцового трансформатора соединена первичная обмотка образцовой катушки M взаимной индуктивности, вторичная обмотка которой замкнута на реохорд ab .

Вторичный ток I_{02} образцового трансформатора проходит по контуру $I_{10}AB'ВДИ_{20}$.

Вторичный ток I_{x2} поверяемого трансформатора проходит по контуру $I_{1x}ДВВ'БИ_{2x}$.

Таким образом, в сопротивлении $r_{ВД}$ идет ток ΔI , равный разности токов \bar{I}_{x2} и \bar{I}_{02} .

На векторной диаграмме рис. 19-18,б даны векторы этих трех токов. На той же диаграмме дан вектор тока I_{03} вторичной обмотки катушки взаимной индуктивности. Так как э. д. с., наведенная во вторичной обмотке катушки взаимной индуктивности, отстает по фазе от тока I_{02} на $\angle \pi/2$, а сопротивление этой цепи активное, то ток I_{03} также отстает по фазе от тока I_{02} на $\angle \pi/2$.

Считая погрешности образцового трансформатора тока равными нулю, угол δ'_x , образованный векторами токов I_{x2} и I_{02} , можно рассматривать как угловую погрешность поверяемого трансформатора тока.

Так как угловая погрешность трансформаторов тока мала (порядка 1°), то ток I_{x2} (рис. 19-18,б) с достаточной точностью можно считать равным проекции его вектора на направление вектора тока I_{02} , т. е.

$$I_{x2} \cos \delta'_x = I_{x2} = I_{02} + \Delta I \cos \phi,$$

откуда погрешность трансформатора по току

$$\gamma_x = \frac{I_{x2} - I_{02}}{I_{02}} 100\% = \frac{\Delta I \cos \phi}{I_{02}} 100\%. \quad (19-2)$$

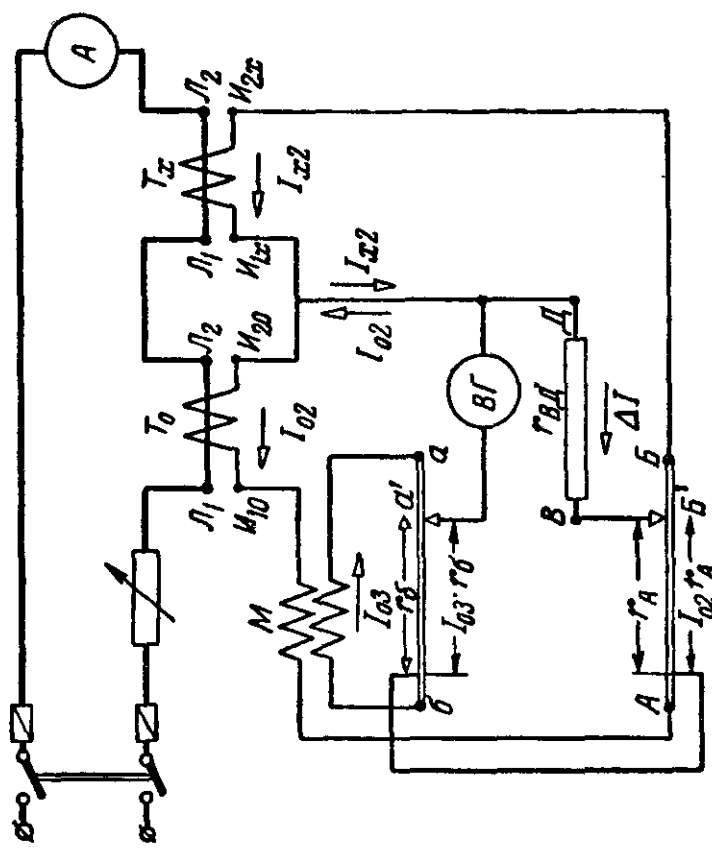


Рис. 19-18а. Принципиальная схема поверки трансформатора тока при помощи дифференциального прибора.

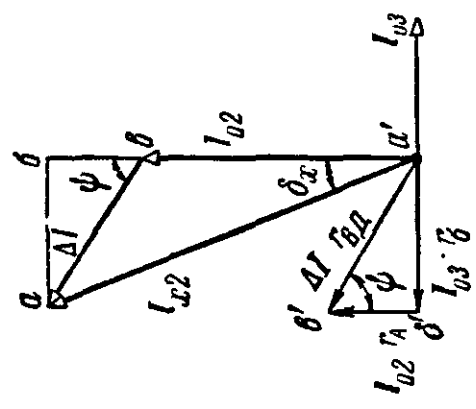


Рис 19-18б. Векторная диаграмма к схеме на рис. 19-18а.

Из той же векторной диаграммы с достаточной точностью получим:

$$\operatorname{tg} \delta'_x = \frac{\Delta I \sin \phi}{I_{02}}.$$

Но так как δ'_x мал, то $\delta'_x = \operatorname{tg} \delta'_x$ и, следовательно,

$$\delta'_x = \frac{\Delta I \sin \phi}{I_{02}}.$$

Выражая δ'_x не в радианах, а в минутах, получаем:

$$\delta'_x = 3\,438 \frac{\Delta I \sin \phi}{I_{02}} = \frac{\Delta I \sin \phi}{0,000291 I_{02}}. \quad (19-3)$$

Для определения погрешностей трансформатора движки прибора a' и b' перемещают так, чтобы получить нулевое значение тока в вибрационном гальванометре ($\alpha_r = 0$). В этом случае вектор падения напряжения на сопротивлении $r_{ВД}$ будет равен сумме векторов падений напряжений на сопротивлениях r_A и r_6 (рис. 19-18а и 19-18б).

Падение напряжения на сопротивлении r_A совпадает по фазе с током I_{02} , а падение напряжения на сопротивлении r_6 , сдвинуто по фазе относительно тока I_{02} на $\angle \pi/2$. Таким образом, треугольники abv и $a'b'v'$ (рис. 19-18,б) будут подобны, откуда

$$\cos \phi = \frac{I_{02} r_A}{\Delta I r_{ВД}},$$

а

$$\sin \phi = \frac{I_{02} r_6}{\Delta I r_{ВД}}.$$

Подставляя полученные значения в формулы (19-2) и (19-3), получаем:

$$\gamma'_x = \frac{\Delta I I_{02} r_A}{I_{02} \Delta I r_{ВД}} 100\% = \frac{r_A}{r_{ВД}} 100\% \quad (19-4)$$

и

$$\delta'_x = \frac{\Delta I I_{02} r_6}{0,000291 I_{02} \Delta I r_{ВД}} = k \frac{r_6}{r_{ВД}}, \quad (19-5)$$

где $k = \frac{1}{0,000291} \cdot \frac{I_{02}}{I_{02}}$ — постоянный коэффициент.

Полученные выражения показывают, что погрешности поверяемого трансформатора определяются отношением сопротивлений

$$\frac{r_A}{r_{ВД}} \text{ и } \frac{r_6}{r_{ВД}}.$$

Сопротивления r_b , r_A и $r_{ВД}$, а также взаимная индуктивность катушки M выбираются с таким расчетом, чтобы на шкалах, по которым определяются положения движков a' и b' , можно было непосредственно отсчитывать значения величин γ'_x и δ'_x .

До сих пор мы предполагали, что образцовый трансформатор тока не имеет погрешностей. В действительности же они имеются у каждого трансформатора.

Для определения действительных погрешностей поверяемого трансформатора найденные значения погрешностей необходимо сложить с соответствующими погрешностями образцового трансформатора; таким образом, действительные погрешности поверяемого трансформатора определяются как

$$\gamma_x = \gamma'_x + \gamma_0; \quad (19-6)$$

$$\delta_x = \delta'_x + \delta_0. \quad (19-7)$$

19-10. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ОДИНАРНЫМ МОСТОМ (РАБОТА 9)

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их номинальные величины, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Заснять монтажные схемы имеющихся мостов, например РЗЗЗ, (УМВ), РЗ16, ММВ, РЗ8.

4 Измерить одним из мостов каждое из двух данных сопротивлений.

5. Соединить сопротивления последовательно и измерить их эквивалентное сопротивление.

6. Соединить сопротивления параллельно и измерить их эквивалентное сопротивление.

7. Найденные в пп. 5 и 6 значения сопротивлений проверить подсчетом по формулам

$$r'_x = r_{x1} + r_{x2}$$

и

$$r''_x = \frac{r_{x1} r_{x2}}{r_{x1} + r_{x2}}.$$

Таблица 19 14

№ наблюдений	r_1	r_2	$\frac{r_1}{r_2}$	r	r_x	U_n	P_n	Примечание
	ом	ом	—	ом	ом	в	вт	

8. Определить сопротивление вольтметров различных систем, применяя поочередно каждый из мостов. Сравнить найденные значения сопротивлений, полученные при измерении разными мостами. Подсчитать и сравнить мощности потерь вольтметров различных систем при номинальном напряжении.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-14.

19-11. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ ДВОЙНЫМ МОСТОМ (РАБОТА 10)

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их номинальные величины, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Ознакомиться детально и снять монтажную схему моста.

4. Соединить приборы по схеме рис. 9-29 или 9-30 и показать ее для проверки руководителю.

5. Определить сопротивления нескольких металлических стержней, измерить их длину и сечение и определить удельные сопротивления их

6. Определить сопротивления амперметров различных систем.

Подсчитать и сравнить мощность потерь амперметров при номинальном токе.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-15.

Таблица 19-15

№ наблюдений	$r_1 = r'_1$	$r_2 = r'_2$	$\frac{r_1}{r_2}$	r	r_x	l	S	ρ	Примечание
	ом	ом	—	ом	ом	м	мм ²	ом·мм ² /м	

19-12. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ИЗОЛЯЦИИ (РАБОТА 11)

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные величины, классы точности, заводы и заводские номера.

2. Пользуясь мегомметром, определить сопротивление изоляции двухпроводной установки, не находящейся под рабочим напряжением (рис. 9-33,а).

Сопротивления определить: а) между каждым из проводов и землей; б) между двумя проводами.

Результаты измерений записать в табл. 19-16.

Таблица 19-16

№ наблюдений	Испытание мегомметром			Испытание вольтметром						Примечания
	r_{xA}	r_{xB}	r_{xAB}	U	U_A	U_B	r_V	r_{xA}	r_{xB}	
	ом	ом	ом	в	в	в	ом	ом	ом	

3. Включив испытуемую установку под рабочее напряжение и пользуясь вольтметром, определить сопротивление изоляции каждого из проводов относительно земли (рис. 9-37).

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-16.

4. Пользуясь мегомметром, определить сопротивление изоляции обмоток статора трехфазного двигателя (рис. 9-33,б).

Сопротивления определить: а) между каждой из обмоток и корпусом (землей); б) между каждыми двумя обмотками двигателя.

Наблюдения записать в табл. 19-17.

Таблица 19-17

№ наблюдений	r_{xA}	r_{xB}	r_{xC}	r_{xAB}	r_{xBC}	r_{xCA}	Примечания
	ом	ом	ом	ом	ом	ом	

19-13. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЯ (РАБОТА 12)

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы. Записать номинальные величины приборов, системы, классы точности, заводские номера, а также заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему по рис. 19-19 и показать ее для проверки руководителю.

4. Пользуясь методом амперметра и вольтметра, определить сопротивление испытуемого заземления r_x , вспомогательного заземления r_v и сопротивления зонда $r_{3н}$.

Результаты наблюдений и подсчета записать также в табл. 19-18.

5. Собрать схему по рис. 9-49 и дать ее для проверки руководителю.

6. Пользуясь измерителем заземлений типа МС-08, определить сопротивления r_x , r_B и r_{3H} .

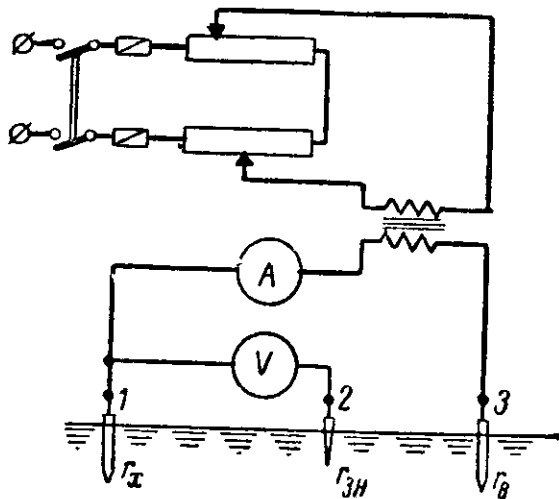


Рис. 19-19.

Результаты наблюдений записать в табл. 19-18.

Таблица 19-18

№ наблюдений	Метод амперметра и вольтметра					Измеритель заземлений			Примечания
	U	I	r_x	r_B	r_{3H}	r_x	r_B	r_{3H}	
	в	а	ом	ом	ом	ом	ом	ом	

19-14. ИЗМЕРЕНИЕ ИНДУКТИВНОСТИ МОСТОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (РАБОТА 13)

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, и записать их технические данные.

2. Собрать схему по рис. 10-11,а и показать ее для проверки руководителю.

3. Определить индуктивность двух данных катушек.

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-19.

Таблица 19-19

№ наблюдений	L_0	r_3	r_4	L_x	Примечания
	гн	ом	ом	гн	

19-15. ИЗМЕРЕНИЕ ЕМКОСТИ МОСТОМ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА (РАБОТА 14)

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, и записать их технические данные.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Собрать схему (рис. 10-15,а) и показать ее для проверки руководителю.

4. Определить емкость двух данных конденсаторов, сначала каждого в отдельности, а затем эквивалентную емкость при последовательном и параллельном соединении их.

Величину эквивалентной емкости проверить по формулам

$$C'_3 = \frac{C_{1x}C_{2x}}{C_{1x} + C_{2x}} \text{ — при последовательном соединении и}$$

$$C''_3 = C_{1x} + C_{2x} \text{ — при параллельном соединении конденсаторов.}$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-20.

Таблица 19-20

№ наблюдений	r_2	r_4	C_0	C_x	Примечания
	ом	ом	мкф	мкф	

19-16. ПОВЕРКА И РЕГУЛИРОВКА ИНДУКЦИОННОГО СЧЕТЧИКА (РАБОТА 15)

Поверка счетчика имеет целью выяснить, удовлетворяет ли счетчик техническим условиям, предъявляемым к нему ГОСТ 6570-53.

Поверка счетчика заключается: 1) в определении холостого хода; 2) в определении чувствительности и 3) в определении погрешности счетчика.

Для определения холостого хода соединяют приборы по схеме на рис. 19-15,а, отключают реостат r_2 , переключатель ставят в по-

ложение c , замыкают рубильник, устанавливают реостатом r_1 напряжение, равное 110%, номинального, и наблюдают, вращается ли счетчик при этих условиях.

Если счетчик не вращается или, сделав часть оборота или целый оборот, останавливается и дальше не вращается, то счетчик не имеет холостого хода.

Для определения чувствительности счетчика при номинальном напряжении на параллельной цепи счетчика, уменьшая сопротивление реостата r_2 , определяют по ваттметру нагрузку, при которой счетчик начинает вращаться.

При этом опыте необходимо иметь в последовательной цепи счетчика: а) амперметр на номинальный ток, составляющий 2—5% номинального тока счетчика; б) реостат (r_2), дающий возможность получить токи в этой цепи, составляющие 0,1—5% номинального тока счетчика.

Для определения погрешности при номинальном напряжении на зажимах счетчика изменяют сопротивление реостата r_2 и устанавливают по ваттметру нагрузку 10%, номинальной ($\cos \varphi = 1$, переключатель стоит в положении c).

При этой нагрузке за время $t = 100\text{—}120$ сек отсчитывают целое число оборотов N , совершенное диском счетчика, отмечая ток I , напряжение U и мощность P .

Записав все величины, определяют действительную постоянную счетчика

$$k = \frac{Pt}{N}.$$

Определив постоянную счетчика k и зная номинальную постоянную k_n , можно определить погрешность счетчика

$$\gamma_k = \frac{k_n - k}{k} 100\%.$$

Такое же определение постоянной счетчика и его погрешности производят для нагрузок 25 и 50, 75 и 100%, номинальной.

Точно так же производится поверка счетчика при $\cos \varphi = 0,5$.

Если поверка счетчика дает результаты, не удовлетворяющие техническим условиям, то производится регулировка счетчика.

Одна из возможных схем соединения для регулировки счетчика дана на рис. 19-16.

Как известно, эта схема дает возможность получения сдвига 90° между током последовательной обмотки и напряжением на параллельной цепи, необходимого для производства регулировки.

Сама регулировка ведется следующим образом:

1. При отсутствии тока в последовательной обмотке счетчика и номинальном напряжении убеждаются в отсутствии вращения диска счетчика. В противном случае устраняют вращение перемещением винта a (рис. 12-1).

2. Установив реостатами r_2 (рис. 19-16) номинальный ток и реостатом r_1 — номинальное напряжение, поворачивают ротор фазорегулятора до тех пор, пока ваттметр не покажет нуль. Это соответствует углу сдвига между I и U в 90° ($\cos \varphi = 0$). После этого изменяют сопротивление, на которое замкнута дополнительная обмотка,

наложенная на последовательный сердечник счетчика (рис. 12-1), до тех пор, пока счетчик не остановится, что укажет на то, что между вектором параллельного магнитного потока и вектором напряжения получен сдвиг $\beta = 90^\circ + \alpha_1$.

3. При номинальном токе и номинальном напряжении при $\cos \varphi = 1$ перемещением тормозного магнита M добиваются скорости вращения счетчика, соответствующей номинальной постоянной.

4. При номинальном напряжении и токе 10% номинального при $\cos \varphi = 1$ перемещением винта B добиваются скорости вращения диска, соответствующей номинальной постоянной счетчика.

5. При напряжении, повышенном на 10% номинального, при $\cos \varphi = 1$ и нагрузке, не превышающей 1% номинальной, тормозная проволока T_2 загибается так, чтобы счетчик при этой нагрузке начал вращаться.

Задание

1. Ознакомиться детально с конструкцией счетчика и заснять эскиз.

2. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, и записать их системы, номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

3. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

4. Соединить приборы по схеме рис. 19-15 или 19-16 и показать ее для проверки руководителю.

5. Определить, вращается ли счетчик при отсутствии нагрузки.

6. Определить чувствительность счетчика (нагрузку, при которой счетчик начинает вращаться).

7. Определить постоянную счетчика при нагрузках 10, 25, 50, 75 и 100% номинальной

8. Определить постоянную счетчика при нагрузках, указанных в п. 7, при угле сдвига тока относительно напряжения 60° ($\cos \varphi = 0,5$).

9. Определить погрешности счетчика при указанных нагрузках.

10. Построить кривые погрешностей в зависимости от нагрузки: а) при $\cos \varphi = 1$; б) $\cos \varphi = 0,5$.

Все наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-21.

Таблица 19-21

№ наблюдений	U	I	P	$\cos \varphi$	τ	N	k	k_H	γ_k	Примечания
	B	A	$вт$	—	сек	оборотов	$вт \cdot сек/об$	$вт \cdot сек/об$	%	

11. Дать заключение о поверяемом счетчике.

19-17. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВУХЭЛЕМЕНТНЫМ ВАТТМЕТРОМ (РАБОТА 16а)

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, записать их системы, номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Определить зажимы последовательных и параллельных обмоток ваттметра (см. § 11-6).

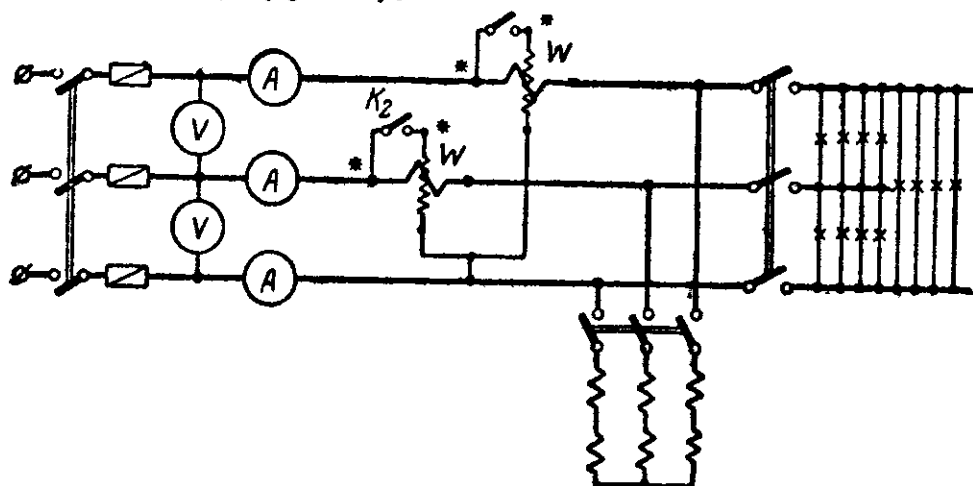


Рис. 19-20. Схема соединения для измерения мощности двухэлементным ваттметром.

4. Определить: а) принадлежность обмоток к отдельным элементам, б) генераторные зажимы обмоток.

5. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 19-20, и показать ее для проверки руководителю.

6. Произвести два измерения мощности при равномерной активной нагрузке; сверить показания двухэлементного ваттметра с величиной мощности, определенной из показаний амперметров и вольтметров.

Убедиться в том, что:

$$а) P'_W = P''_W; \quad б) P_W = P'_W + P''_W; \quad в) Q = \sqrt{3}(P'_W - P''_W) = 0;$$

$$г) \operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P'_W - P''_W}{P'_W + P''_W} = 0,$$

где P'_W — мощность, учитываемая первым элементом ваттметра (отсчитывается по ваттметру при замкнутом рубильнике K_1 и разомкнутом рубильнике K_2);

P''_W — мощность, учитываемая вторым элементом ваттметра;

P_W — показание двухэлементного ваттметра (определяется при замкнутых рубильниках K_1 и K_2);

Q — реактивная мощность цепи трехфазного тока.

7. Произвести два-три измерения активной мощности при равномерной нагрузке с углом сдвига $\varphi < 60^\circ$.

Проверить, что $P_W = P'_W + P''_W$.

Определить:

а) $\cos \varphi = \frac{P_W}{\sqrt{3}IU}$;

б) $\angle \varphi$ (по косинусу угла);

в) $Q = \sqrt{3}(P'_W - P''_W)$;

г) $\operatorname{tg} \varphi = \sqrt{3} \frac{P'_W - P''_W}{P'_W + P''_W}$;

д) $\angle \varphi$ (по тангенсу угла).

8. При равномерной нагрузке, изменяя реактивное сопротивление цепи, получить показание второго элемента ваттметра равным нулю ($P''_W = 0$) и проверить, что $P_W = P'_W$.

Определить все величины, указанные в п. 7.

9. При равномерной нагрузке с углом сдвига $\varphi > 60^\circ$ произвести два измерения активной мощности. Проверить, что $P_W = P'_W + (-P''_W) = P'_W - P''_W$.

Определить все величины, указанные в п. 7.

10. Произвести два-три измерения при неравномерной нагрузке и убедиться, что $P_W = P'_W + P''_W$ или $P_W = P'_W - P''_W$.

Наблюдения и подсчеты свести в табл. 19-22.

Таблица 19-22

№ наблюдений	I_A	I_B	I_C	U	P'_W	P''_W	P_W	Q	S	$\cos \varphi$	$\angle \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\angle \varphi$	Примечание
	a	a	a	a	$вт$	$вт$	$вт$	$ва$	$ва$	—	$град$	—	$град$	

19-17а. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ ДВУХЭЛЕМЕНТНЫМ ВАТТМЕТРОМ С ТРАНСФОРМАТОРАМИ ТОКА (РАБОТА 166)

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для работы, записать их системы, номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Определить зажимы последовательных и параллельных обмоток ваттметра (см. § 11-6).

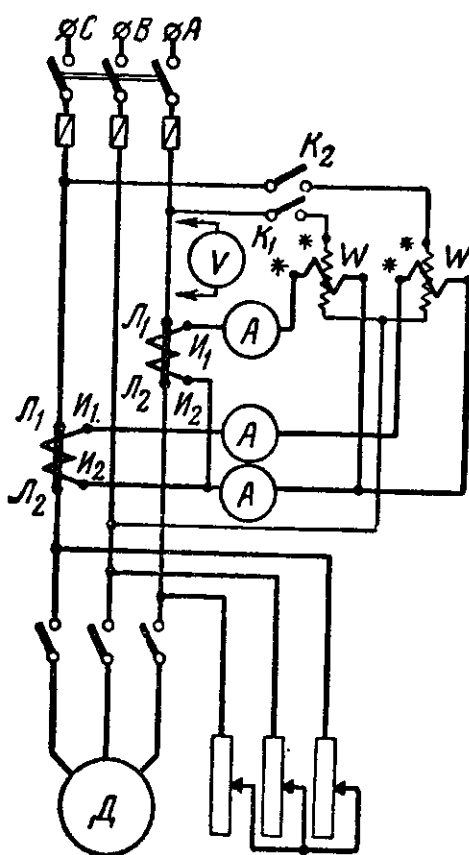


Рис. 19-21. Схема соединения для измерения мощности двухэлементным ваттметром с трансформаторами тока.

4. Определить: а) принадлежность обмоток к отдельным элементам; б) генераторные зажимы обмоток.

5. Произвести разметку зажимов (или проверить ее) трансформаторов тока.

6. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 19-21, и показать ее для проверки руководителю.

7. Произвести два измерения мощности при равномерной активной нагрузке; сверить показания ваттметра с величиной мощности, определенной из показаний амперметров и вольтметра.

Убедиться в том, что:

а) $P'_W = P''_W$;

б) $P_W = P'_W + P''_W$;

в) $P = k_R P_W$;

г) $Q = k_B \sqrt{3} (P'_W - P''_W) = 0$;

д) $\operatorname{tg} \varphi = \frac{Q}{P} = 0$.

где P'_W — мощность, учитываемая первым элементом ваттметра (отсчитывается по ваттметру при замкнутом рубильнике K_1 и разомкнутом рубильнике K_2);

P''_W — мощность, учитываемая вторым элементом ваттметра;

P_W — показания двухэлементного ваттметра (определяются при замкнутых рубильниках K_1 и K_2);

P — активная мощность цепи трехфазного тока;

Q — реактивная мощность цепи трехфазного тока.

8. Произвести два-три измерения мощности при равномерной нагрузке фаз с углом сдвига $\varphi < 60^\circ$.

Проверить, что $P_W = P'_W + P''_W$.

Определить:

а) $P = k_R P_W$;

б) $Q = k_B \sqrt{3} (P'_W - P''_W)$;

в) $\cos \varphi = \frac{P_W}{\sqrt{3}IU}$;

г) угол φ (через его косинус);

д) $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$;

е) угол φ (через его тангенс).

9. При равномерной нагрузке, изменяя реактивное сопротивление цепи, получить показание второго элемента ваттметра, равное нулю $P''_W = 0$; проверить, что $P_W = P'_W$.

Определить все величины, указанные в п. 8.

10. При равномерной нагрузке с углом сдвига $\varphi > 60^\circ$ произвести два измерения мощности.

Проверить, что $P_W = P'_W + P''_W = P'_W - [P''_W]$.

Определить все величины, указанные в п. 8.

11. Произвести два измерения мощности при неравномерной нагрузке и убедиться, что $P_W = P'_W + P''_W$.

Наблюдения и расчеты записать в табл. 19-23.

Таблица 19-23

№ наблюдений	I_A	I_B	I_C	k_H	U	P'_W	P''_W	P_W
	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>a</i>	—	<i>a</i>	<i>вт</i>	<i>вт</i>	<i>вт</i>

№ наблюдений	P	Q	S	$\cos \varphi$	$\angle \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$	$\angle \varphi$	Примечание
	<i>вт</i>	<i>вар</i>	<i>ва</i>	—	<i>град</i>	—	<i>град</i>	

19-18. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА (РАБОТА 17)

В практике встречаются случаи неправильного соединения зажимов ваттметров (счетчиков) и измерительных трансформаторов.

Рассмотрим несколько неправильных схем включения.

1. На рис. 19-22,а дана правильная схема включения двухэлементного ваттметра через измерительные трансформаторы. Если переключить одну из обмоток второго трансформатора тока, то трансформатор тока в проводе B будет включен неправильно (L_1 поставлено на место L_2 или I_1 на место I_2); это влечет за собой изменение фазы тока $I'_{\text{лв}}$, проходящего через последовательную обмотку второго элемента ваттметра, на 180° (рис. 19-22,б). Следовательно, ток, проходящий по последовательной обмотке второго элемента, будет сдвинут относительно приложенного к параллельной обмотке этого элемента напряжения $U'_{\text{вс}}$ на угол $180 - (30^\circ + \varphi_{\text{в}})$. Показание двухэлементного ваттметра в этом случае будет:

$$P'_W = I'_{\text{лв}} U'_{\text{вс}} \cos(30^\circ - \varphi_A) + I'_{\text{лв}} U'_{\text{вс}} \cos(150^\circ - \varphi_B).$$

Но так как мы рассматриваем случай равномерной нагрузки, то

$$\begin{aligned} P'_W &= I'_{\text{лв}} U' [\cos(30^\circ - \varphi) + \cos(150^\circ - \varphi)] = \\ &= I'_{\text{лв}} U' 2 \cos(90^\circ - \varphi) \cos 60^\circ = I'_{\text{лв}} U' \sin \varphi. \end{aligned}$$

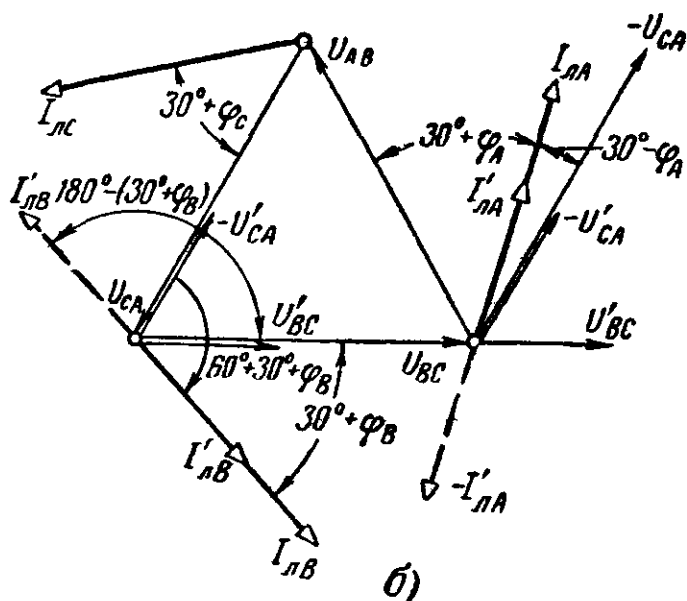
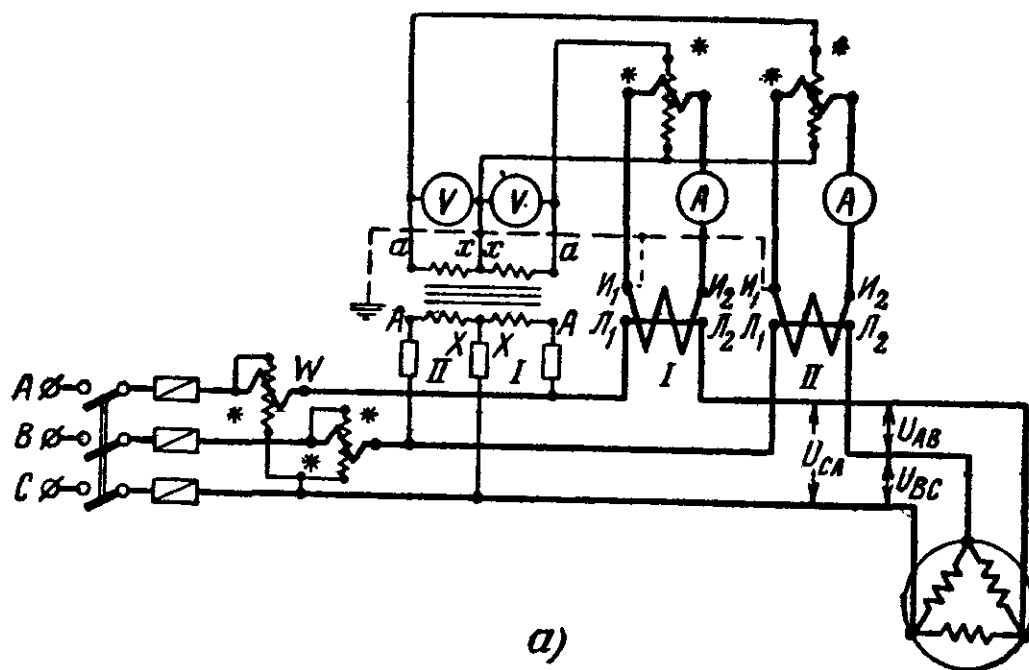


Рис. 19-22. Измерение мощности в высоковольтной цепи трехфазного тока.

а — схема соединения; б — векторная диаграмма.

При правильной схеме включения ваттметр должен показать

$$\sqrt{3} I'_{\text{л}} U' \cos \varphi.$$

В приведенных формулах штрихами отмечены величины для вторичной цепи.

Поправочный коэффициент, на который нужно множить показания включенного по такой неправильной схеме ваттметра для того, чтобы получить мощность, соответствующую показанию правильно

включенного ваттметра, может быть найден из следующего соотношения:

$$\sqrt{3} I'_{\pi} U' \cos \varphi = C_1 I'_{\pi} U' \sin \varphi.$$

откуда

$$C_1 = \frac{\sqrt{3} I'_{\pi} U' \cos \varphi}{I'_{\pi} U' \sin \varphi} = \sqrt{3} \operatorname{ctg} \varphi.$$

2. Допустим, что трансформатор тока в проводе A включен неправильно: L_1 включен на место L_2 или, что то же, H_1 — на место H_2 (рис. 19-22,а).

Такое неправильное включение трансформатора опять влечет за собой изменение фазы тока, идущего через последовательную обмотку первого элемента ваттметра, на 180° (см. векторную диаграмму на рис. 19-22,б) и, следовательно, показания ваттметра будут определяться выражением

$$P'_W = I'_{\pi A} U'_{AC} \cos [180^\circ - (30^\circ - \varphi_A)] + I'_{\pi B} U'_{BC} \cos (30^\circ + \varphi_B),$$

а так как мы рассматриваем случай равномерной нагрузки, то

$$\begin{aligned} P' &= I'_{\pi} U' [\cos (150^\circ + \varphi) + \cos (30^\circ + \varphi)] = \\ &= I'_{\pi} U' 2 \cos \frac{180^\circ + 2\varphi}{2} \cos \frac{120^\circ}{2} = I'_{\pi} U' 2 \cos (90^\circ + \varphi) \cos 60^\circ = \\ &= -I'_{\pi} U' \sin \varphi. \end{aligned}$$

Ваттметр отклоняется в обратную сторону (счетчик вращается также в обратную сторону).

Поправочный коэффициент для этого случая будет равен:

$$C_2 = \frac{\sqrt{3} I'_{\pi} U' \cos \varphi}{-I'_{\pi} U' \sin \varphi} = -\sqrt{3} \operatorname{ctg} \varphi.$$

3. Допустим, что трансформаторы напряжения включены неправильно, а именно, зажим A первого трансформатора подключен к проводу B , а зажим A второго трансформатора — к проводу A (рис. 19-22,а).

В этом случае показания двухэлементного ваттметра могут быть выражены (см. векторную диаграмму рис. 19-22,б) как

$$P'_W = I'_{\pi A} U'_{BC} \cos [60^\circ + (30^\circ - \varphi_A)] + I'_{\pi B} U'_{AC} \cos [60^\circ + (30^\circ + \varphi)],$$

а так как мы рассматриваем случай равномерной нагрузки, то

$$P'_W = I'_{\pi} U' [\cos (90^\circ - \varphi) + \cos (90^\circ + \varphi)] = I'_{\pi} U' (\sin \varphi - \sin \varphi) = 0.$$

В этом случае показания ваттметра, как видим, будут равны нулю.

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их номинальные величины, системы, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители.

2. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

3. Пользуясь вольтметром, определить зажимы последовательных и параллельных обмоток ваттметра.

4. Определить принадлежность отдельных обмоток к тому или иному элементу ваттметра и найти генераторные зажимы последовательных и параллельных обмоток ваттметра.

5. Проверить правильность разметки концов трансформаторов тока и напряжения.

6. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 19-22,а, и показать ее для проверки руководителю.

7. Включить напряжение, произвести запись показаний всех приборов и убедиться в том, что

$$P_W = P' k_{HI} k_{HU},$$

где P_W — мощность трехфазной цепи, измеренная ваттметром, включенным непосредственно в первичную цепь;

P' — показание двухэлементного ваттметра, включенного через измерительные трансформаторы;

k_{HI} и k_{HU} — коэффициенты трансформации трансформатора тока и напряжения.

8. Поменять местами зажимы первичной обмотки трансформатора тока II (J_1 включить на место J_2), записать показания приборов и убедиться в том, что

$$P' k_{HI} k_{HU} C_1 = P.$$

9. Переключить зажим А первого трансформатора напряжения с провода А на провод В, а зажим А второго трансформатора напряжения переключить с провода В на провод А.

Включить напряжения и убедиться в том, что показание двухэлементного ваттметра, включенного через измерительные трансформаторы, равно нулю.

Наблюдения и подсчеты свести в табл. 19-24.

Таблица 19 24

№ наблюдений	U'_{BC}	U'_{CA}	I'_A	I'_B	P'	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	P	$P = P' k_{HI} k_{HU}$	$\cos \varphi$	$\angle \varphi$	C	Примечания
	в	в	а	а	вт	в	в	а	а	вт	вт	—	град	—	

19-19. ВКЛЮЧЕНИЕ СЧЕТЧИКОВ АКТИВНОЙ И РЕАКТИВНОЙ ЭНЕРГИИ В ЦЕПЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА (РАБОТА 18)

Задание

1. Ознакомиться детально с устройством счетчиков активной и реактивной энергии и записать технические данные счетчиков, снять схемы и эскизы.

2. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их системы, номинальные величины, классы точности, заводские номера и заводы-изготовители

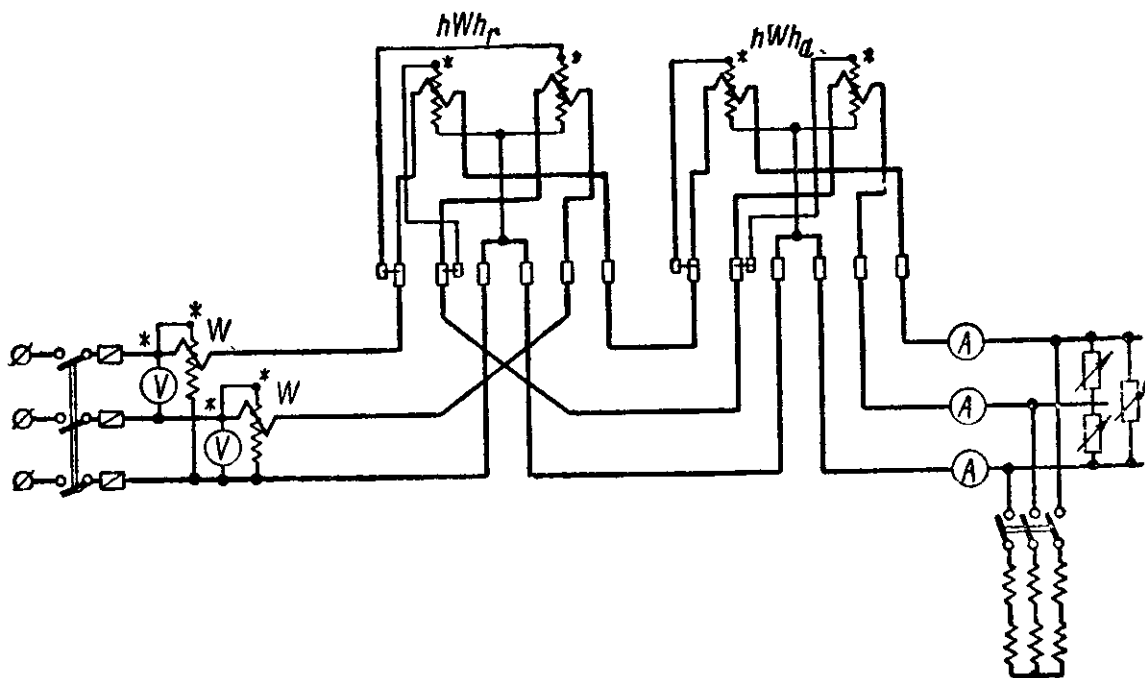


Рис. 19-23. Схема включения счетчиков активной и реактивной энергии в цепь трехфазного тока.

3. Проверить возможность применения имеющейся аппаратуры в данной схеме.

4. Определить последовательность фаз трехфазной цепи.

5. Соединить приборы по схеме на рис. 19-23 и показать ее для проверки руководителю.

6. При равномерной безреактивной нагрузке убедиться в отсутствии вращения реактивного счетчика.

7. При равномерной нагрузке за какой-либо промежуток времени t определить по счетчикам активную и реактивную энергию, израсходованную в сети, и записать показания всех приборов в табл. 19-25.

По данным наблюдений определить:

а) из показаний ваттметров, вольтметров и амперметров

$$\cos \varphi = \frac{P_w}{\sqrt{3}IU};$$

б) из показаний счетчика активной и реактивной энергии определить средневзвешенный коэффициент мощности установки за данный отрезок времени.

$$\cos \varphi_{\text{ср}} = \frac{W_a}{\sqrt{W_a^2 + W_r^2}};$$

в нашем случае коэффициент мощности цепи остается постоянным; в практике же коэффициент мощности установки изменяется, а средневзвешенный коэффициент мощности данной установки за какой-то промежуток времени определяется по приведенной формуле или через

$$\text{tg } \varphi_{\text{ср}} = \frac{W_r}{W_a};$$

в) сравнить полученные величины;

г) определить действительную постоянную для счетчика активной энергии и его погрешность.

Действительную постоянную счетчика можно определить по формуле

$$k = \frac{P_w t}{N'},$$

где P_w — мощность, измеряемая ваттметрами;

N' — число оборотов, сделанных диском счетчика за время t .

Погрешность счетчика можно определить по формуле

$$\gamma_k = \frac{k_n - k}{k} 100\%.$$

где k_n — номинальная постоянная;

д) определить действительную постоянную для счетчика реактивной энергии и его погрешность.

Действительную постоянную счетчика реактивной энергии можно определить по формуле

$$k = \frac{Qt}{N''},$$

где Q — реактивная мощность, определяемая выражением

$$Q = \sqrt{3}IU \sin \varphi;$$

N'' — число оборотов, сделанных диском счетчика за время t ;

($\sin \varphi$ определяется через $\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{3}IU}$).

Погрешность счетчика определяется по формуле

$$\gamma_k = \frac{k_n - k}{k} 100\%.$$

Наблюдения и подсчеты записать в табл. 19-25.

№ наблюдений	I	U	P	P_V	P_U	P_c	P_{co}	B_m	f	G	Примечания
	a	b	$вт$	$вт$	$вт$	$вт$	$вт/кг$	$вб/м^2$	$гц$	$кг$	

19-21. ЭЛЕКТРОННЫЙ ОСЦИЛЛОГРАФ (РАБОТА 20)

На рис. 19-25 дан внешний вид электронного осциллографа типа ЭО-7. На передней стороне его, кроме экрана, укреплена панель управления.

Осциллограф присоединяется к сети переменного тока с напря-

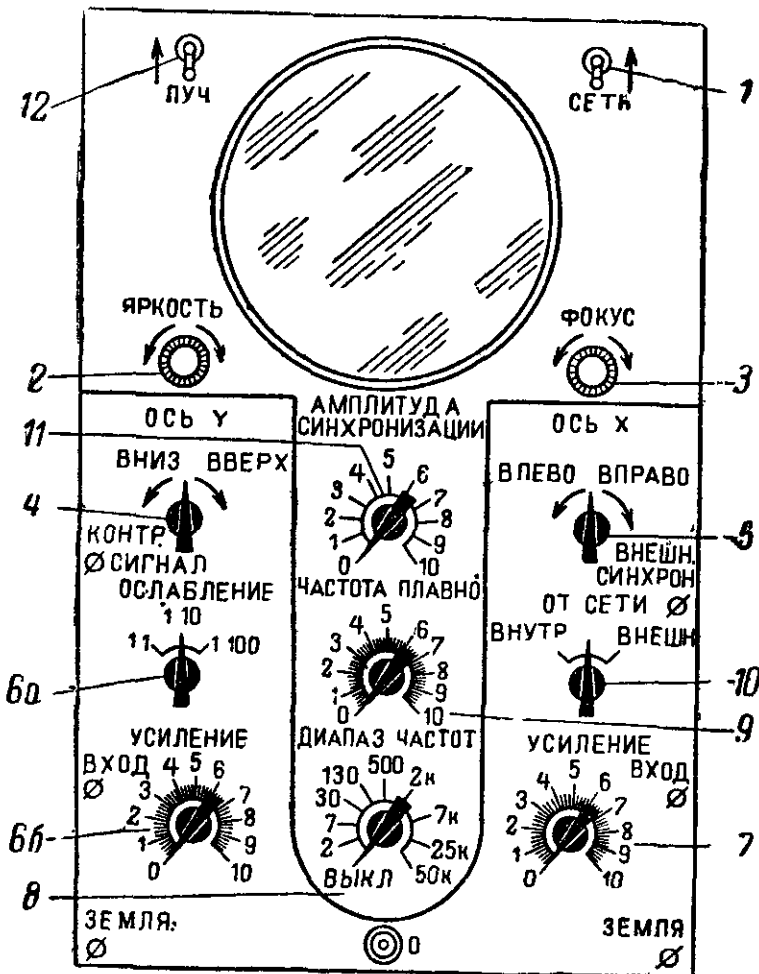


Рис. 19-25. Внешний вид электронного осциллографа.

жением 127—220 в при помощи соединительного провода, контакты для которого расположены на задней стороне осциллографа.

На панели управления расположены:

1 — Ручка выключателя, при помощи которого производится включение осциллографа в сеть переменного тока; при этом загорается сигнальная лампочка Л.

2 — Ручка «Яркость», связанная с движком реостата r_1 (рис. 15-5); при ее повороте изменяется потенциал управляющего электрода и

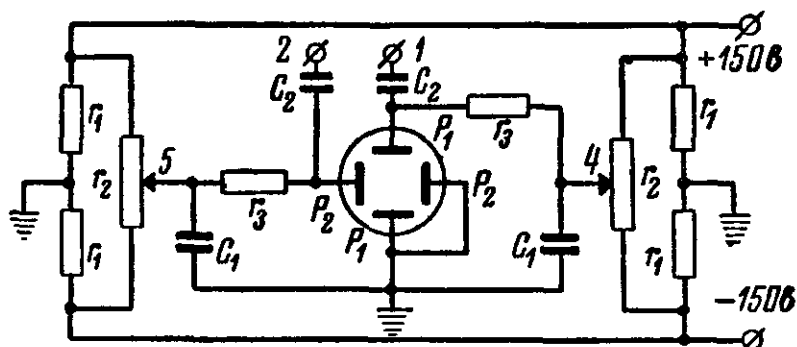
изменяется количество электронов в луче, т. е. изменяется яркость пятна на экране.

3 — Ручка «Фокус», связанная с движком реостата r_2 (рис. 15-15); при ее повороте изменяются потенциал первого анода (A_1) и фокусное расстояние.

4 — Ручка «Ось Y» и 5 — ручка «Ось X» (рис. 19-26), связанные с движками 4 и 5 реостатов r_2 — r_2 , которые являются делителями напряжений. При изменении положения движков (при повороте ручек 4 и 5) изменяются потенциалы отклоняющих пластин, изменяются напряженности поля между пластинами и, следовательно, электронный луч изменяет свое положение на экране, смещаясь соответственно по оси Y или по оси X.

6a — Ручка «Ослабление», связанная с ножом переключателя входного делителя напряжения (аттенюатора). При положении ручки 1:1 на входные зажимы может быть подано переменное напряжение с действующим значением не более 2,5 в; при положении руч-

Рис. 19-26. Схема регулировки потенциалов отклоняющих пластин.



ки 1:10 напряжение на входные зажимы может быть подано не более 25 в и при положении ручки 1:100 соответственно 250 в.

6б — Ручка «Усиление» (вертикальное), связанная с движком делителя напряжения. В зависимости от величины исследуемого напряжения большая или меньшая доля его, определяемая положением движка делителя, подается на сетку электронной лампы усилителя. Выходной зажим усилителя соединяется с зажимом 1 (рис. 19-26), который соединен с отклоняющей пластиной P_1 электроно-лучевой трубки.

Таким образом, положением ручек 6a и 6б можно в широких пределах изменять отношение между исследуемым напряжением, подведенным к зажимам «Вход—Земля», расположенным на левой стороне панели, и напряжением, получаемым на отклоняющих на пластинах P_1 .

7 — Ручка «Усиление» (горизонтальное), связанная с движком второго делителя напряжения, соединенного со своим усилителем. Ручкой 7, так же как и ручкой 6б, можно изменять соотношение между напряжением, подведенным к зажимам «Вход—Земля», расположенным на правой стороне панели, и напряжением, получаемым на отклоняющих пластинах P_2 (зажим 2, рис. 19-26).

8 — Ручка «Диапазон» частот, которая изменяет емкость C генератора пилообразного напряжения (рис. 19-27), изменяя скорость зарядки конденсатора, а следовательно, частоту пилообразного напряжения.

9 — Ручка «Частота» плавно изменяющая сопротивление, через которое происходит заряд конденсатора в генераторе пилообразного

напряжения (рис. 19-27), изменяя скорость зарядки конденсатора, а следовательно, и частоту пилообразного напряжения.

10 — Ручка, которая может быть установлена в три положения: «Внутренняя», «От сети» и «Внешняя».

Для получения неподвижного изображения исследуемого напряжения на экране осциллографа необходимо, чтобы период пилообразного напряжения был в точности равен периоду исследуемого напряжения или в целое число раз меньше его.

Если периоды напряжений не будут удовлетворять указанному равенству, то изображение кривой на экране будет перемещаться

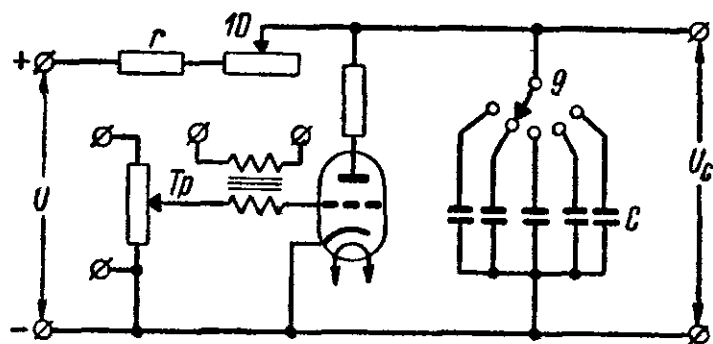


Рис. 19-27. Схема генератора пилообразного напряжения.

с тем большей скоростью, чем в большей степени не выполнено указанное условие. Генераторы пилообразного напряжения имеют низкую устойчивость в отношении частоты.

Для получения неподвижного изображения необходима синхронизация генератора пилообразного напряжения с исследуемым напряжением или с напряжением какого-нибудь постороннего источника напряжения, например с частотой сети, от которой питается осциллограф.

Синхронизирующее напряжение подается на сетку тиратрона генератора пилообразного напряжения через трансформатор (рис. 19-27), вызывая отпирание или запирающее тиратрона с определенной частотой, тем самым выполняя синхронизацию.

Ручка управления 10 при синхронизации от исследуемого напряжения ставится в положение «Внутренняя»; при синхронизации с напряжением сети, от которой питается осциллограф, в положение «От сети»; при синхронизации с внешним источником, который должен быть присоединен к зажимам «Внешняя синхронизация» и «Земля», ручка 10 ставится в положение «Внешняя».

11 — Ручка «Амплитуда синхронизации», регулирующая амплитуду синхронизирующего напряжения, которая должна быть тем больше, чем больше частота генератора отличается от частоты синхронизирующего напряжения.

12 — Ручка выключателя «Луч», служащая для выключения электронного луча. Ярко сфокусированное пятно, вызванное электронным лучом, нельзя оставлять на экране неподвижным во избежание обесцвечивания экрана.

Задание

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для производства работы, записать их номинальные величины, классы точности, системы, заводские номера, заводы-изготовители и другие данные.

2. Установить ручки управления: 1 — выключен; 2, 3, 4, 5 — средние положения; 6а — положение 1 : 100; 6б и 7 — нулевые положения; 8 — положение 30—130; 9 — нулевое положение; 10 — внутренняя; 11 — положение 2—3; 12 — положение «включен».

3. Собрать схему по рис. 19-28, присоединить зажимы осциллографа «Вход» и «Земля», расположенные с левой стороны панели, к зажимам С—С и показать ее руководителю.

4. Присоединить цепь питания осциллографа к сети переменного тока; поворотом ручки выключателя 1 включить его.

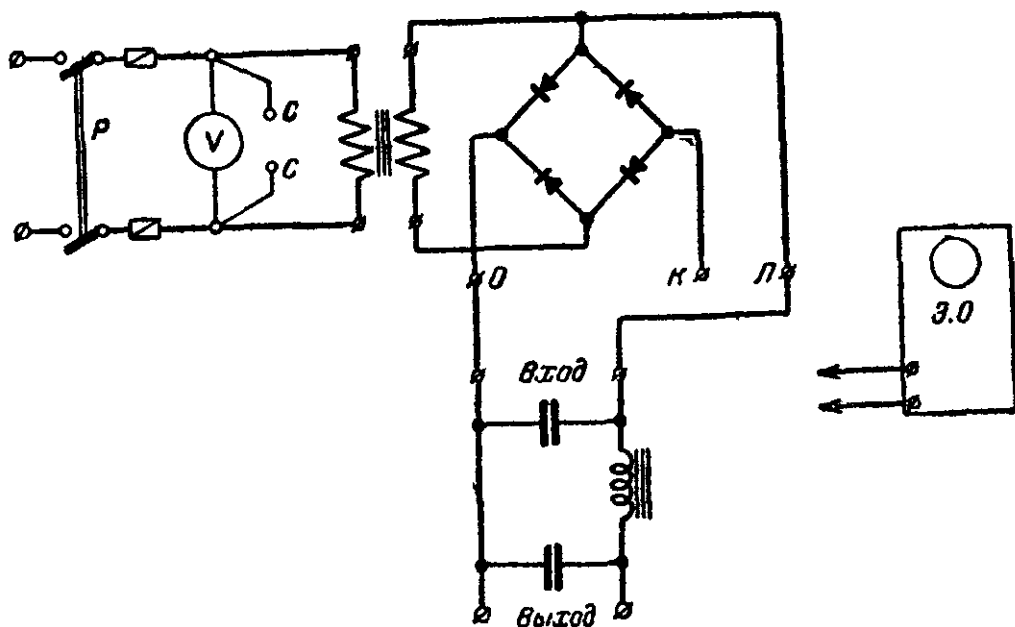


Рис. 19-28. Схема включения осциллографа для получения кривой выпрямленного напряжения.

5. После появления на экране осциллографа светлого пятна, воздействуя на ручки 2 — «Яркость» и 3 — «Фокус», получить сфокусированное яркое пятно.

6. Пользуясь ручками 4 — «Ось Y» и 5 — «Ось X», установить пятно в центре экрана.

7. Замкнуть двухполюсный рубильник P (рис. 19-28), получить на экране кривую исследуемого напряжения и выявить влияние ручек управления на кривую, получаемую на экране осциллографа.

8. Присоединяя зажимы осциллографа «Вход» и «Земля» к точкам цепи ОЛ, а затем к точкам ОК, получить и зарисовать кривые выпрямленных напряжений $U_{ОЛ}$ и $U_{ОК}$.

9. Присоединяя зажимы осциллографа «Вход» и «Земля» к выходным зажимам индуктивно-емкостного фильтра, получить и зарисовать кривые выходного напряжения, выявив, таким образом, роль фильтра.

10. Соединить приборы по схеме, данной на рис. 19-29, и показать ее руководителю.

11. Присоединить зажимы «Вход» и «Земля» осциллографа к точкам цепи 1,1. Получить кривую напряжения на сопротивлении r , которая в другом масштабе является кривой тока в этом сопротивлении.

Увеличивая подводимое напряжение при различных значениях его, проследить за изменением формы кривой намагничивающего тока в катушке со стальным сердечником, зарисовав кривые тока при трех различных значениях и напряжениях.

12. Соединить зажимы трансформаторов *A*, *B*, *C* с сетью трехфазного тока (рис. 19-29). Произвести наблюдения и зарисовать

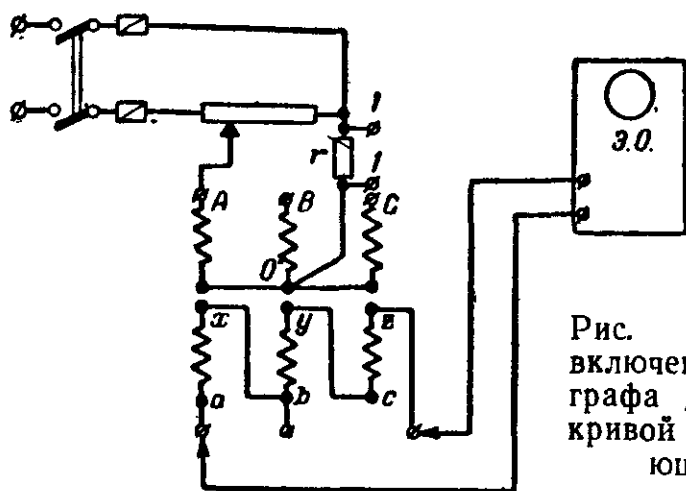


Рис. 19-29. Схема включения осциллографа для получения кривой намагнивающего тока.

кривые линейных и фазных напряжений первичной цепи и суммарную э. д. с. вторичной цепи (между зажимами *az*).

19-22. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ОСЦИЛЛОГРАФ (РАБОТА 21)

Универсальный осциллограф МПО-2 позволяет вести фотозапись измеряемых величин на пленке шириной 35 мм и визуальные наблюдения на экране.

На рис. 19-30 схематически показана панель управления осциллографа.

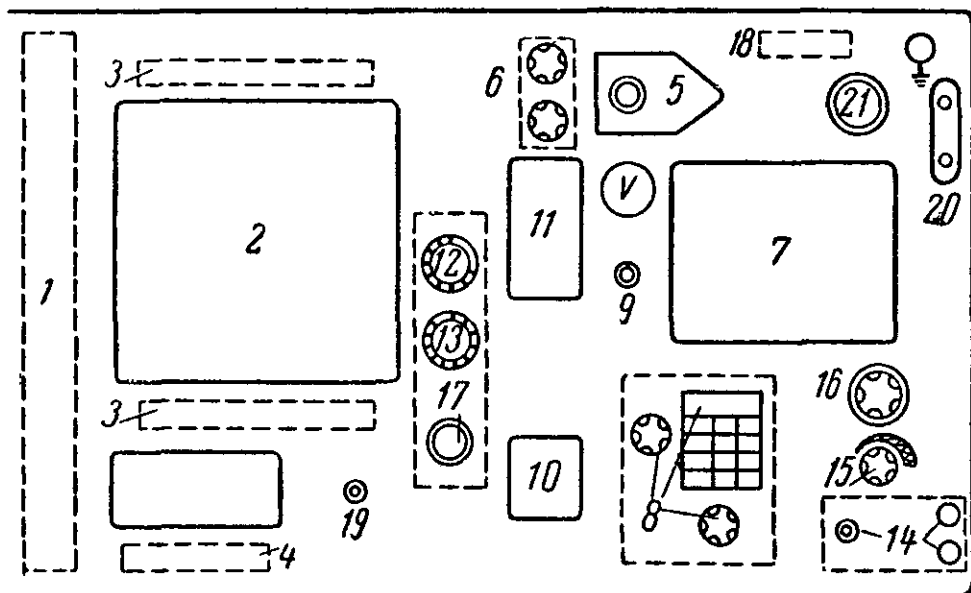


Рис. 19-30. Панель управления осциллографа МПО-2.

На панели управления расположены:

- 1) зажимы для подключения вибраторов и их выключатели;
- 2) крышка блока вибраторов;
- 3) рукоятки для регулировки положения вибраторов (поворот вокруг вертикальной оси), позволяющие выводить световой указатель (отраженный от зеркала вибратора луч) в нужную точку экрана;
- 4) зажимы для включения токовых цепей ваттметровых вибраторов;
- 5) крышка осветителя с контрольным указателем;
- 6) рукоятки для регулировки ширины щелей диафрагмы;
- 7) экран для визуального наблюдения;
- 8) рукоятки для регулирования скорости движения фотопленки (перед поворотом рукоятку необходимо несколько приподнять);
- 9) выключатель электродвигателя;
- 10) кассета для фотопленки;
- 11) приемная кассета, в которую фотопленка при съемке подается лентопротяжным механизмом;
- 12) указатель запаса неиспользованной пленки;
- 13) рукоятка для регулировки длины кадра;
- 14) кнопка включения съемки и зажимы для дистанционного управления съемкой;
- 15) рукоятка выключателя осциллографа и регулятора напряжения накала лампы осветителя (контролируется по вольтметру);
- 16) рукоятка для регулирования скорости вращения зеркального барабана;
- 17) рукоятка для установки блок-контактов, производящих коммутацию в исследуемой цепи при осциллографировании быстропротекающих процессов;
- 18) зажимы для включения коммутирующего устройства в исследуемую цепь; автоматическое коммутирующее устройство позволяет согласовать длину осциллограммы и начало записи до момента коммутации;
- 19) выключатель микрофонного отметчика времени (500 гц), устанавливаемого в первое гнездо блока вибраторов;
- 20) колодка для присоединения осциллографа к сети;
- 21) колодка переключения напряжения 127—220 в.

В осциллографах для записи кривых тока и напряжения применяются магнитоэлектрические петлевые и рамочные вибраторы (см. § 15-2).

При наличии тока в вибраторе возникает вращающий момент (см. § 4-1)

$$M \approx Blbi.$$

Противодействующий момент создается лентой петли вибратора

$$M_{\text{пр}} = Da.$$

Угол поворота зеркала вибратора при постоянном токе

$$\alpha = SI,$$

где $S_I = \frac{Blb}{D}$ — расчетная чувствительность вибратора.

При повороте зеркала вибратора на угол α отклонение отраженного луча на пленке (или на экране) зависит от длины луча

$$a = 2kL\alpha,$$

где L — длина луча от зеркала до пленки (экрана);

k — коэффициент, учитывающий преломление луча при переходе его из одной среды в другую (воздух—жидкость),

или

$$a = 2kLS_I l = S'_I l,$$

где $S'_I = 2kLS_I$ — паспортная чувствительность вибратора к току.

Паспортную чувствительность можно повысить за счет увеличения длины луча L .

В вибраторах мощности магнит заменен электромагнитом, обмотка которого включается в цепь тока (последовательная).

Петля вибратора включается в цепь напряжения (параллельная).

Мгновенное значение вращающего момента

$$M = kii_U,$$

где k — коэффициент пропорциональности;

i — ток последовательной цепи;

i_U — ток параллельной цепи.

Так как

$$i_U = \frac{u}{r_{\text{петли}} + r_{\text{доб}}},$$

то

$$M = kii_U = k_1 P,$$

т. е. вращающий момент, а следовательно, и угол поворота зеркала вибратора пропорциональны мгновенному значению мощности.

Вибраторы характеризуются параметрами, которые указываются в паспорте (см. § 15-2).

Схемы включения вибраторов для измерения тока и напряжения.
Выбор вибраторов

Для измерения тока применяются схемы, данные на рис. 19-31. Схема *a* применяется в том случае, если измеряемый ток меньше допустимого тока вибратора. В схеме *б* через вибратор идет только часть измеряемого тока.

Для измерения напряжения применяются схемы, данные на рис. 19-32. В схеме *a* сопротивление $r_{\text{доб}}$ выбирается с таким расчетом, чтобы ток вибратора i_v был меньше допустимого тока вибратора

$$i_v = \frac{u_x}{r_v + r_{\text{доб}}} < I_{\text{в.доп}},$$

откуда

$$r_{\text{доб}} = \frac{u_x}{i_v} - r_v.$$

Значение тока i_v выбирается, исходя из требуемой амплитуды отклонения луча на пленке (на экране) в одну сторону, с учетом паспортной чувствительности вибратора к току. Расчет сопротив-

ления $r_{доб}$ для схемы б аналогичен рассмотренному, необходимо только учесть передаточное число делителя напряжения r и вместо u_x брать

$$u'_x = \frac{u_x}{k},$$

где k — коэффициент делителя напряжения.

Порядок выбора вибраторов следующий:

1. Разработать электрическую схему для исследований и определить расчетом возможные наибольшие и наименьшие значения величин токов и напряжений, которые будут измеряться (записываться).

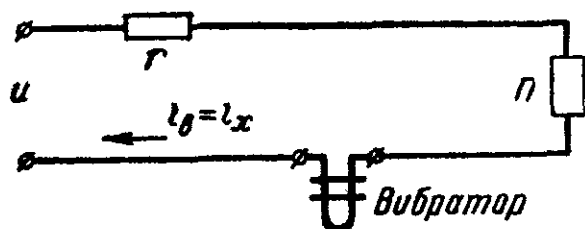
2. Составить схемы включения вибраторов, при этом необходимо учесть, чтобы ток вибратора (амплитуда отклонения луча на пленке или экране в одну сторону) был пропорционален измеряемой величине.

3. Составив схему, следует выбрать тип вибраторов по паспортным данным, рассчитать все добавочные сопротивления, шунты, реостаты и другую аппаратуру схемы.

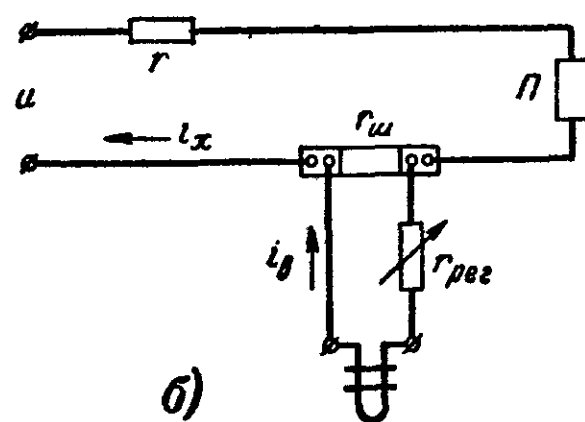
Вибраторы выбираются:

а) По частоте — частота исследуемой величины должна быть в 5 раз меньше частоты собственных колебаний вибратора.

б) По допустимому отклонению луча в одну сторону на пленке (или на экране). Оно должно быть меньше допустимого

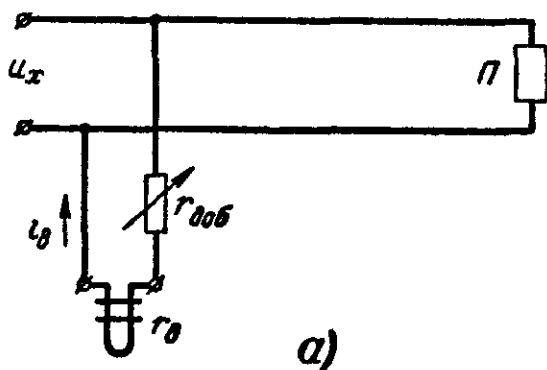


а)

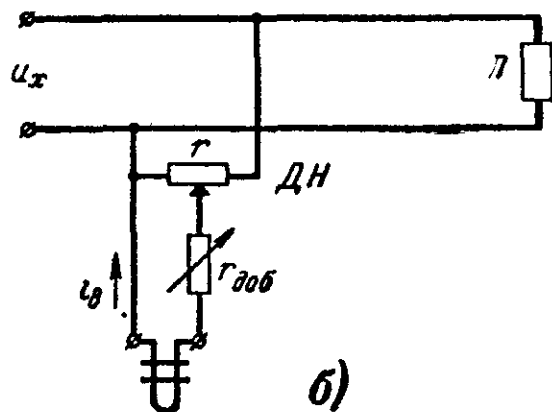


б)

Рис. 19-31. Схемы включения вибраторов для измерения тока.



а)



б)

Рис. 19-32. Схемы включения вибраторов для измерения напряжения.

$$a < a_{\text{доп.}}$$

Величина отклонения луча в одну сторону зависит от тока вибратора. Следует помнить, что в целях осторожности желательно, чтобы a было в 3—5 раз меньше, чем $a_{\text{доп.}}$.

в) Зная выбранное значение a , из соотношения

$$a = S'_I i_v$$

находят ток вибратора и затем по схеме рассчитывают добавочные сопротивления, шунты и т. д.

Можно вместо a задаваться значением i_v , также в 3—5 раз меньшим, чем допустимый ток вибратора $i_{v \text{ доп.}}$.

г) При записи синусоидального тока допустимое действующее значение тока вибратора в $\sqrt{2}$ раз меньше, чем указанное в паспорте вибратора амплитудное значение допустимого тока.

Пример расчета схемы и выбор вибратора.

В схеме на рис. 19-31,б требуется выбрать вибратор и рассчитать шунт и $r_{\text{рег.}}$. Приемник Π включен в цепь с синусоидальным напряжением промышленной частоты. Действующее значение тока меняется в пределах от 3,5 до 6 а.

1 Выбираем вибратор МОВ-2 IV типа.

По таблице данных имеем:

Частота собственных колебаний . . .	3 000 гц
Чувствительность на пленке	$S'_I = 1,0 \text{ мм/ма}$
Сопротивление петли вибратора . . .	6,0 ом
Максимальный допустимый ток . . .	25 ма
Допустимое отклонение луча (на пленке в одну сторону)	25 мм

По частоте вибратор вполне удовлетворяет условиям выбора вибраторов.

2. Имеем стандартный шунт на 7,5 а, 75 мв, который по току можно применить в схеме.

$$3. \text{ При } I = 6 \text{ а} \quad U_{\text{ш}} = 75 \frac{7,5}{6} = 60 \text{ мв.}$$

4. Задаемся амплитудой отклонения луча на пленке в одну сторону (при токе 6 а) $a = 8 \text{ мм}$. Это позволит удобно читать и обработать осциллограмму.

$$\text{При } a = 8 \text{ мм} \quad I_v = \frac{a}{S'_I \sqrt{2}} = \frac{8}{1 \sqrt{2}} = 5,67 \text{ ма.}$$

Общее сопротивление цепи вибратора, подключенного к шунту,

$$r_{\text{рег}} + r_v = \frac{U_{\text{ш}}}{I_v} = \frac{60}{5,67} = 10,6 \text{ ом.}$$

Выбираем реостат для ограничения тока в цепи вибратора $r_{\text{рег}} = 0-10 \text{ ом}$. В качестве реостата можно применить декадный магазин сопротивлений или проволочный реостат с ползушкой.

$$\text{При } r_{\text{рег}} = 0 \quad I_{\text{в}} = \frac{60}{6} = 10 \text{ ма} < \frac{25}{2},$$

т. е. безопасность работы вибратора обеспечена. Изменение сопротивления $r_{\text{рег}}$ позволит плавно изменять амплитуду отклонения луча на пленке (или на экране) в нужных пределах.

Если допустимый ток вибратора неизвестен или требуется уточнить значение чувствительности вибратора к току — S'_I , то нужно провести градуировку вибратора по схеме на рис. 19-33. Схема

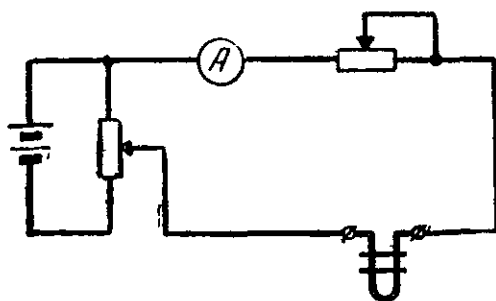


Рис. 19-33. Схема соединения для градуировки вибраторов.

обеспечивает плавную регулировку тока вибратора, который определяется по миллиамперметру. Отклонение луча на экране контролируется по масштабной сетке или по линейке.

Задание

1. Ознакомиться с устройством и принципом действия осциллографа МПО-2.

Зарисовать оптическую схему осциллографа.

2. Изучить конструкцию петлевого вибратора типа МОВ (вибратор дается разобраным), зарисовать его устройство.

Требуется также ознакомиться с таблицей параметров вибраторов МОВ-2 (см. § 15-2).

3. Собрать схему для градуировки вибратора на постоянном токе (рис. 19-33). Для контроля величины тока применить миллиамперметр на соответствующий номинальный ток. Рассчитать аппаратуру в схеме включения вибратора (I или IV типа) с учетом наибольшего допустимого для данного вибратора тока и наибольшего допустимого отклонения луча на экране в одну сторону.

4. Подготовить осциллограф для включения в цепь, для чего необходимо:

а) выключить все выключатели вибраторов;

б) выключить выключатель осциллографа (поворотом против направления вращения часовой стрелки) и выключатель электродвигателя осциллографа;

в) установить переключатель в цепи питания трансформатора в положение, соответствующее напряжению источника питания;

г) открыть защитную крышку экрана;

д) установить в соответствующие гнезда вибраторы для записи тока или напряжения согласно схеме;

5. Произвести градуировку вибратора по току или по напряжению, наблюдая за отклонением светового пятна (световой полосы) на экране осциллографа. Результаты наблюдений с указанием размерностей записать в табл. 19-27.

Таблица 19-27

Значение тока	<i>ма</i>					
Отклонение луча на экране в одну сторону	<i>мм</i>					
Чувствительность вибратора к току	<i>мм/ма</i>					
Среднее значение чувствительности к постоянному току	<i>мм/ма</i>					

Величину отклонения луча определить с помощью полоски миллиметровой бумаги, линейки или по масштабной сетке экрана. По данным расчетов вычислить среднее значение чувствительности вибратора на экране к постоянному току.

Вибраторы очень чувствительны к ударам тока!

Поэтому перед включением их необходимо установить соответствующее минимальным значениям тока в цепи вибратора значения сопротивлений и положения движков реостатов. Затем, плавно изменяя положения движков реостатов или уменьшая сопротивление в цепи вибратора, получить отклонения луча на экране, равные 10, 20, 30, 40, 50 мм, но не более.

6. Собрать схему согласно рис. 19-34 для наблюдения кривых тока и напряжения в цепи r , L и C при изменении параметров (L или C). Рассчитать значения $r_{ш}$, $r_{д1}$ и $r_{д2}$, максимальное значение тока в цепи вибратора при выбранном значении напряжения питания и для определенных отклонений светового пятна на экране, не превышающих 50—60% допустимой амплитуды отклонения для данного типа вибраторов. Схемы и расчеты показать для проверки руководителю.

7. Провести визуальное наблюдение на экране кривой тока и напряжения в цепи, обратив внимание на изменение величины и фазы тока при изменении параметров цепи. Результаты наблюдений зарисовать в отчет в виде трех осциллограмм при $\varphi > 0$, $\varphi = 0$, $\varphi < 0$.

Методические указания к работе с осциллографом:

1. Перед включением осциллографа в сеть необходимо выполнить все указания согласно п. 4 настоящей работы.
2. Включить осциллограф в сеть и, включив выключатель (рукоятка поворачивается по часовой стрелке), плавно увеличивать напряжение накала лампы до 3—4 в, но не более.
3. Ширину щели диафрагмы при визуальном наблюдении рекомендуется установить от 0,2 до 0,3 мм (по шкале).
4. Поворачивая с помощью приспособления вибратор в гнезде, вывести (при отключенном вибраторе) световой указатель-луч на

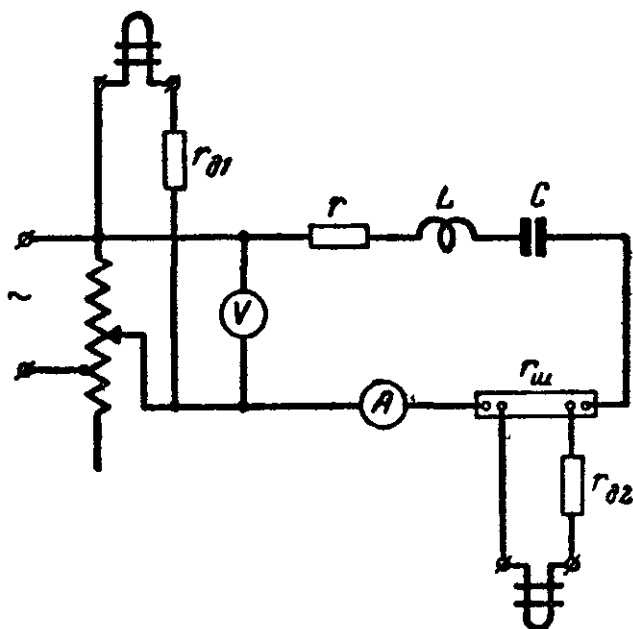


Рис. 19-34. Схема соединения для наблюдения кривых тока и напряжения в цепи, содержащей r , L и C .

середину экрана. Луч может оказаться и вне пределов экрана, что зависит от положения зеркального барабана. Тогда необходимо немного повернуть зеркало, включив на короткий промежуток электродвигатель.

5. Установить реостатом и сопротивлениями минимальный ток в цепи вибратора, включить выключатель вибратора и наблюдать за отклонением луча. Убедиться в правильности регулировки тока в цепи вибратора. Такую проверку необходимо выполнить для каждого вибратора.

6. При выполнении градуировки вибратора по току или по напряжению предпочтительно иметь схемы включения вибраторов с возможностью плавной регулировки тока в них. При выборе схем необходимо учитывать, чтобы ток вибратора (угол отклонения зеркальца) был пропорционален измеряемой величине (I_x или U_x). В цепях переменного тока при использовании измерительных трансформаторов тока и напряжения возможны погрешности по току, напряжению и из-за неточности передачи по фазе измеряемых величин.

7. Для визуального наблюдения рекомендуется при отключенном двигателе установить скорость записи 500 мм/сек. Для лучшей видимости наблюдаемых кривых на экране можно предусмотреть затемнение помещения или закрыть экран от внешних источников света.

8. Для того чтобы увидеть на экране неподвижные кривые тока и напряжения, необходимо при включенном электродвигателе правильно установить скорость вращения зеркального барабана (скорость вращения барабана должна соответствовать частоте исследуемого процесса). Это достигается вращением рукоятки магнитоиндукционного регулятора скорости.

9. При наблюдении и записи величин и их фазовых соотношений надо правильно включать вибраторы с учетом полярности. В противном случае может иметь место сдвиг по фазе не на угол φ , а на угол $(\pi + \varphi)$. К осциллографу МПО-2 по особому заказу комплектно поставляется специальный магазин шунтов и добавочных сопротивлений, позволяющий подключать одновременно восемь вибраторов для записи тока или напряжения. К магазину прилагаются восемь соединительных штепсельных вилок с разметкой однополярных штеккеров. Схема устройства и применение магазина типа Р-1 должны быть рассмотрены особо.

10. Следует соблюдать осторожность при работе с осциллографом и вибраторами. Необходимо помнить, что подготовка к работе, расчет аппаратуры и схемы, выбор вибраторов должны выполняться с предельной тщательностью. При выполнении исследований на подготовительные и расчетные операции отводится 80—90% общего бюджета времени. После окончания записи или визуального наблюдения исследуемого процесса вибраторы необходимо сразу же отключать.

Во время выполнения лабораторной работы с осциллографом, и особенно при исследованиях в условиях производства, необходимо строжайше соблюдать правила техники безопасности. Включение вибраторов в цепи высокого напряжения без особых защитных мер недопустимо.

Приложение

ГОСУДАРСТВЕННЫЕ СТАНДАРТЫ ПО ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ ПРИБОРАМ

№ п/п.	Номер и год выпуска	Наименование стандарта
1	ГОСТ 9867-61	Международная система единиц
2	ГОСТ 8033-56	Электрические и магнитные единицы
3	ГОСТ 1845-59	Приборы электроизмерительные. Общие технические условия
4	ГОСТ 8711-60	Амперметры и вольтметры. Технические требования
5	ГОСТ 8623-60	Приборы электроизмерительные. Сопро- тивления добавочные взаимозаменяемые. Технические требования
6	ГОСТ 8042-56	Шунты калиброванные
7	ГОСТ 1609-42	Провода калиброванные парные сопротив- лением 0,035 ом для электроизмери- тельных приборов. Общие технические условия
8	ГОСТ 1954-55	Нормальные элементы (меры электродви- жущей силы)
9	ГОСТ 7003-54	Катушки электрического сопротивления измерительные
10		Магазины сопротивлений измерительные
11	ГОСТ 9999-62	Приборы электроизмерительные самопи- шущие
12	ГОСТ 7324-55	Гальванометры постоянного тока
13	ГОСТ 9245-59	Потенциометры постоянного тока измери- тельные
14	ГОСТ 6570-53	Счетчики электрические переменного тока
15	ГОСТ 7746-55	Трансформаторы тока
16	ГОСТ 1983-43	Трансформаторы напряжения
17	ГОСТ 9032-59	Трансформаторы измерительные лабора- торные

ЛИТЕРАТУРА

1. Курс электрических измерений, под редакцией В. Т. Прыткова и А. В. Талицкого, Госэнергоиздат, 1960.
2. Электрические измерения, под редакцией А. В. Фремке, Госэнергоиздат, 1954.
3. Арутюнов В. О., Электрические измерительные приборы и измерения, Госэнергоиздат, 1958.
4. Турчин А. М., Электрические измерения, Госэнергоиздат, 1961.
5. Касаткин А. С., Электрические измерения, Госэнергоиздат, 1946.
6. Вострокнутов Н. Г., Техника измерений электрических и магнитных величин, Госэнергоиздат, 1958.
7. Магаршак Б. Г., Электрические измерения, Судпромгиз, 1962.
8. Мамонтов П. Н., Сборник задач по электрическим измерениям, Судпромгиз, 1962.
9. Чертов А. Г., Международная система единиц измерения, Росвуиздат, 1963.
10. Грибанов Ю. И., Измерение слабых токов, зарядов и больших сопротивлений, Госэнергоиздат, 1962.
11. Арутюнов В. О., Расчет и конструкции электроизмерительных приборов, Госэнергоиздат, 1956.
12. Маликов С. Ф., Введение в технику измерений, Машгиз, 1952.
13. Карандеев К. Б., Методы электрических измерений, Госэнергоиздат, 1952.
14. Карандеев К. Б., Мостовые методы измерений, Гостехиздат УССР, 1953.
15. Вострокнутов Н. Г. и Илюкович А. М., Испытания электрических счетчиков, Госэнергоиздат, 1961.
16. Горюнов П. Н., Пигин С. М. и Шумиловский Н. Н., Электрические счетчики, Госэнергоиздат, 1951.
17. Сербиновский Г. В. и Федотов Б. Н., Организация учета электрической энергии, Госэнергоиздат, 1953.
18. Власов М. Ф., Пигин С. М. и Черников В. И., Сборка и регулировка электроизмерительных приборов, Госэнергоиздат, 1955.
19. Буловский П. И. и Поваляев А. В., Технология сборки электроизмерительных приборов, Оборонгиз, 1955.
20. Шилоносов М. А., Электрические контрольно-измерительные приборы (ремонт и испытания), Машгиз, 1955.

21. Темников Ф. Е., Автоматические регистрирующие приборы, Машгиз, 1954.
 22. Пальм А. П., Регистрирующие приборы, Издательство иностранной литературы, 1955.
 23. Стекольников И. А., Электронный осциллограф, Госэнергоиздат, 1949.
 24. Бурьянов Б. П., Магнитоэлектрический осциллограф, Госэнергоиздат, 1952.
 25. Малов В. С., Телемеханика в энергетических системах, Госэнергоиздат, 1955.
 26. Лурье А. И., Электрические измерения в сетях сильного тока, Госэнергоиздат, 1948.
 27. Кифер И. И., Испытания ферромагнитных материалов, Госэнергоиздат, 1962.
 28. Туричин А. М., Электрические измерения неэлектрических величин, Госэнергоиздат, 1959.
 29. Корндорф С. Ф., Бернштейн А. С. и Ярославский М. И., Радиоизмерения, Госэнергоиздат, 1956.
 30. Ремез Г. А., Курс основных радиотехнических измерений, Связьиздат, 1955.
 31. Мннин Г. П., Эксплуатация электроизмерительных приборов, Госэнергоиздат, 1959.
 32. Барзилович В. М., Высоковольтные трансформаторы тока, Госэнергоиздат, 1962.
 33. Шкурин Г. П., Справочник по электроизмерительным и радиоизмерительным приборам, Оборонгиз, 1960.
-

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютная погрешность 17, 21
 поправка 17
 Активная мощность 319, 335, 338, 343
 Ампер 44, 48
 Амперметры 111, 143, 149, 155, 158, 218, 495, 496, 501
 Астатический механизм 91, 97

 Баллистический гальванометр 123, 133, 418, 420, 422
 Бифилярная намотка 35

 Вариация показаний прибора 20
 Вариометр 42
 Ваттметр, включение через измерительные трансформаторы 329, 331, 353
 — двухэлементный 347
 — постоянная 324, 326, 341
 — трехэлементный 336
 — ферродинамический 327
 — электродинамический 315
 Вероятная погрешность 28
 Вероятное значение величины 27
 Взаимная индуктивность, измерение 296, 309
 — — катушка 41
 Вибрационная система 53
 Вибрационнопрочные приборы 58
 Вибрационноустойчивые приборы 58
 Вибрационный гальванометр 138
 — частотомер 387
 Вихревые токи 71, 102
 Внешнее критическое сопротивление гальванометра 131
 Воздушный успокоитель 70
 Вольтметры 111, 143, 149, 155, 158, 162, 164
 Вращающий момент 60, 62
 Выпрямительная система 53, 143, 385, 474

 Габаритные размеры приборов 60
 Гальванометр 123
 — баллистический 133, 418, 420, 422
 — вибрационный 138
 — выбор 140
 — дифференциальный 133
 — зеркальный 135
 — чувствительность к напряжению 131, 132
 — — — току 124, 126
 Гальванометрический усилитель 141
 Генератор пилообразного напряжения 413
 Генераторные зажимы 316, 317
 Гистерезис, петля 429, 432
 — потери 445
 Градуировка гальванометра 487, 490
 Градус Кельвина 47

 Двухэлементный ваттметр 347
 — счетчик 367
 Действительная постоянная счетчика 363
 Действительное значение величины 17
 — — меры 17
 Декадный магазин сопротивления 39
 Делитель напряжений 153, 182
 Динамическая устойчивость трансформатора тока 211
 Дифференциальный гальванометр 133
 — метод измерения 15
 Добавочное сопротивление 115
 Добротность катушки 41, 308
 Дополнительная погрешность прибора 72
 Допустимая погрешность 20, 72

 Единицы электрических величин 44
 Емкость, измерение 298, 300, 301, 311

 Заземление 281
 Замещения метод измерения 15, 257
 Зеркальная шкала 69
 Зеркальный гальванометр 135
 — отсчет 124

 Измерение взаимной индуктивности 296, 309
 — емкости 298, 311
 — индуктивности 294, 305
 — магнитного потока 418
 — магнитной индукции 422
 — мощности 315
 — напряжения 218
 — напряженности магнитного поля 422

Измерение потерь в стали 442
 — сдвига фаз 376
 — сопротивлений 238
 — тока 218
 — частоты 381
 — энергии 357
 Измеритель заземленный 287, 289
 Измерительная цепь (схема) 61
 Измерительные клещи 213
 — трансформаторы 192
 Измерительный прибор 14
 Изоляция приборов 76
 Индуктивные преобразователи 461
 Индукционная система 51, 102
 Индукционные преобразователи 469
 Ионизационные преобразователи 468

Каскадный трансформатор напряжения 200
 — — тока 213
 Катушка взаимной индуктивности 41
 — индуктивности 41
 — сопротивления 32
 Керн 62, 66
 Килограмм 44
 Классификация приборов 49
 Классы точности измерительных приборов 53
 — — трансформаторов напряжения 198
 — — — тока 214
 Компенсационный метод измерения напряжения 173
 Контроль изоляции в цепях 3 фазного тока 276
 Корректор 62
 Косвенный метод измерения 15
 Коэффициент добротности 67
 — мощности 376
 — трансформации трансформатора напряжения 194
 — — — тока 203
 Кривая намагничивания 429
 Критическое сопротивление 131

Лабораторные измерительные приборы 16
 — меры 16
 Лентопротяжный механизм 392
 Линейный мост 263
 Личная погрешность 21
 Логометры 84, 90, 95

Магазин емкостей 43
 — индуктивностей 42
 — сопротивлений 34
 Магнитные единицы 46
 Магнитный шунт 136
 Магнитоиндукционный успокоитель 70
 Магнитоэлектрическая система 51
 Магнитоэлектрический вибрационный гальванометр 138
 — гальванометр 123
 — измерительный механизм 77
 — прибор 111
 — счетчик 375
 Манганин 32, 33
 Мгновенная мощность 318
 Мегометр 250

Международная система единиц (СИ) 44
 Мера взаимной индуктивности 41
 — емкости 42
 — индуктивности 41
 — сопротивления 32
 — э д с 30
 Метод дифференциальный 15
 — замещения 15
 — косвенный 15
 — непосредственной оценки 14
 — нулевой 15
 — петли 279
 — сравнения 14
 Метр 44
 Метрологическая точность 16
 Момент вращающий 62
 — компенсирующий трение 365
 — противодействующий 62
 — трения 65
 — устанавливающий 64
 Мост двойной 265
 — для измерения взаимной индуктивности 309
 — — — емкости 311
 — — — индуктивности 305, 307
 — — — частоты 388
 — комбинированный 268
 — линейный (реохордный) 263
 — неуравновешенный 264
 — одинарный 260
 — переменного тока, условия равновесия 302
 — с автоматическим уравниванием 264
 — типа МКМВ 262
 — — ММВ 263
 — — МТ 5 267
 — — МТВ 268
 — — УМВ 261
 — уравновешенный 264
 — шестиплечий 308
 Мощность активная 319
 — мгновенная 319
 — потеря 74, 75
 — средняя 319
 Мультивибратор 415

Нагрузочная кривая счетчика 366
 Номинальная мощность трансформатора 197
 — нагрузка трансформатора тока 207
 Номинальное значение меры 17
 Нормальный элемент 30
 Нулевая точка искусственная 339
 Нулевой метод 15
 Нуль-индикатор 224

Обозначения на приборах 54
 Образцовая катушка взаимной индуктивности 41
 — — индуктивности 41
 — — сопротивления 32
 — мера 16
 — — ограниченной точности 16
 Образцовый измерительный прибор 16
 — конденсатор 42
 Объемное сопротивление 249
 Одинарный мост 260
 Омметр 245

Определенные кривой гистерезисного цикла 429
 — места повреждения изоляции 279
 — обмоток ваттметра 336
 — потеря в стали 442
 Оптическая система осциллографа 404
 Основная погрешность прибора 72
 Осциллограф электромеханический 400
 — электронный 407
 Отклонение каждого луча 410
 Отметчик времени 402
 Относительная погрешность измерения 18, 21
 Отсчетное устройство 69
 Охранное кольцо 244

Перегрузочная способность приборов 74

Передаточное число счетчика 364
 Переходное сопротивление 240
 Период колебаний гальванометра 133, 136
 Пермеаметр 430
 Поверка измерительных приборов 20, 495
 — индукционного счетчика 511
 — технического ваттметра 498
 — трансформатора тока 502
 Поверхностное сопротивление 243
 Повреждение изоляции линии 279
 Погрешность абсолютная 21
 — вероятная 28
 — дополнительная 20, 72
 — измерения 20
 — личная 21
 — методическая 21
 — наибольшая возможная 23
 — основная 19, 72
 — остаточная 28
 — относительная 18
 — предельная 28
 — приведенная 19, 72
 — систематическая 21
 — случайная 22
 — трансформаторов 194, 199, 204, 214
 — температурная 86, 118, 119
 — угловая 195, 204, 320
 — установки 21
 Подпятник 66
 Поправка 18
 Поправочный множитель 18
 Постоянная ваттметра 324, 326, 341
 Постоянная времени катушки сопротивления 34
 — гальванометра 136, 138
 — действительная 363
 — номинальная 364
 — пояса 426
 — прибора 67
 — счетчика 363
 — флюксметра 422
 Потенциалометр 424
 Потенциометр автоматический 184
 — переменного тока 186
 — постоянного тока 176
 Потери в стали 442
 Преобразователи емкостные 463
 — индуктивные 461
 — индукционные 469
 — ионизационные 468

Преобразователи пьезоэлектрические 470

— сопротивления 449
 — термоэлектрические 471
 — фотоэлектрические 464
 — электролитические 460
 Приборы, классификация 49
 — непосредственной оценки 49
 — показывающие 50
 — с непосредственным отсчетом 50
 — — непрерывной записью 390
 — — точной записью 395
 — — управляемым отсчетом 50
 — самопишущий 50
 — сравнения 50
 — условные знаки (обозначения) 54
 Промахи 21, 22
 Противодействующий момент 62
 Прямой метод измерения 14
 Пятистержневой трансформатор напряжения 278

Рабочие измерительные приборы 16

— меры 16
 Развертка по времени 411
 Разделение потерь в стали 444
 Разметка зажимов ваттметров 336
 — — измерительных трансформаторов 334
 Разномерный магазин сопротивлений 38
 Реактивная мощность 319
 Реактивный ваттметр 324, 349
 Регистрирующие приборы 390
 Регулировка индукционного счетчика 511
 Релаксационный генератор 413
 Реостатный преобразователь 449
 Рычажный магазин сопротивлений 37

Самопишущие приборы 390

Самоход счетчика 365
 Свеча 47
 Секунда 44
 Синхронизация 526
 Систематическая погрешность 21
 Случайная погрешность 21
 Слюдяной конденсатор 43
 Сопротивление добавочное 115
 — заземления 282
 — критическое 131
 — переходное 240
 — растеканию 282
 Составные элементы электрических цепей 481
 Сравнение частот при помощи электронного осциллографа 416
 Стали листовые испытание 442, 444
 Стрелочный гальванометр 124, 487
 Суммирование 478
 Сходимость моста 304
 Счетный механизм 363
 Счетчик активный 357
 — ампер-часов 375
 — двухдисковый 368
 — двухэлементный 367
 — индукционный 357
 — магнитоэлектрический 375
 — однодисковый 368
 — однофазный 357
 — реактивный 369

- Счетчик трехдисковый 367
 — трехфазный 367
 — трехэлементный 367
 — электродинамический 374
 Тангенс угла потерь 312
 Телеизмерительные системы интен-
 сивности 473
 — — частотные и импульсные 475
 Тепловые приборы 109
 Термическая устойчивость 210
 Термопреобразователь 447, 454
 Термосопротивление 447, 454
 Термоэлектрические приборы 149
 Технические меры 17
 — приборы 17
 Токовые весы 48
 Точность измерительного прибора
 63, 72
 Трансформатор напряжения 193
 — — классы точности 199
 — — постоянного тока 217
 — — пятистержневой 277
 — тока 201
 — — динамическая устойчивость 210
 — — каскадный 213
 — — компенсированный 208
 — — проверка 502
 — — термическая устойчивость 210
 Трансформаторы измерительные 192
 Трехэлементный ваттметр 336
 Тряскопрочные приборы 58
 Тряскоустойчивые приборы 58

 Угловая погрешность 195, 204, 320
 Ударопрочные приборы 58
 Удельный противодействующий мо-
 мент 63
 — устанавливающий момент 65
 Указания к выполнению лаборатор-
 ных работ 478
 — — проверке приборов 495
 Указатель последовательности фаз
 381
 Условные обозначения приборов
 54—56
 Успокоение приборов 70
 Успокоитель воздушный 70
 — магнитоиндукционный 70
 Устанавливающий момент 64

 Фазометр ферродинамический 376
 — электродинамический 376
 — электромагнитный 380
 Фазоуказатель 381

 Фарадометр 300
 Ферродинамический механизм 98
 Феррометр 436
 Фигура Лиссажу 411, 416
 Флюксметр 420
 Фотокомпенсационный усилитель 153
 Фотоэлектрический преобразователь
 464

 Холла эффект 428
 Холостой ход счетчика 365, 511

 Цифровые приборы 70, 190

 Частотные и импульсные телеизме-
 рительные системы 475
 Частотомер вибрационный 387
 — выпрямительный 385
 — электродинамический и ферроди-
 намический 381
 — электромагнитный 384
 Чувствительность гальванометра 124
 — — баллистического 134
 — счетчика 366
 — электронно-лучевой трубки 410

 Шкалы приборов 69
 Штепсельный магазин сопротивле-
 ний 37
 Шунт 111
 — магнитный 136

 Экран 91
 Электрические единицы 44
 — цепи, составные элементы 481
 Электродинамическая система 51, 92
 Электродинамические приборы 158
 — счетчики 374
 Электромагнитная система 51, 86
 Электромагнитные приборы 155
 Электромеханический осциллограф
 400
 Электронно-лучевая трубка 408
 Электронный вольтметр 164
 — коммутатор 414
 — осциллограф 407
 Электростатическая система 53, 108
 Электростатические приборы 162
 Эталоны 16
 Эффект Холла 428

 Ядерный магнитный резонанс 426

63453 9729