

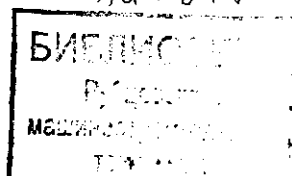
П. К. Хромоин

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

*Рекомендовано Методическим советом Учебно-методического центра
по профессиональному образованию Департамента образования
города Москвы в качестве учебного пособия для студентов
образовательных учреждений среднего
профессионального образования*



МОСКВА
2008



УДК 621.3
ББК 31.294.9
Х94

Рецензенты:

доктор физико-математических наук *М. В. Гальперин*;
председатель цикловой комиссии, преподаватель спецдисциплин
Обнинского политехникума *Н. П. Молоканова*

Хромойн П. К.
Х94 Электротехнические измерения : учебное пособие / П. К. Хромойн. — М. : ФОРУМ, 2008. — 288 с. : ил. — (Профессиональное образование).

ISBN 978-5-91134-273-9

Учебное пособие предназначено для студентов образовательных учреждений среднего профессионального образования, обучающихся по специальности «Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования предприятий и гражданских зданий». Оно может быть полезно студентам смежных специальностей, программа образования которых включает вопросы измерений в энергетических системах с напряжением до 1000 В и в низкочастотных электрических цепях.

УДК 621.3
ББК 31.294.9

ISBN 978-5-91134-273-9

© Хромойн П. К., 2008
© Издательство «ФОРУМ», 2008

Введение

Измерения количественно характеризуют окружающий материальный мир. Известный русский ученый Б. Я. Якоби образно высказался о значении измерений для человека: «Искусство измерения является могущественным оружием, созданным человеческим разумом для проникновения в законы природы и подчинения ее сил нашему господству».

В практической жизни человек всюду имеет дело с измерениями. На каждом шагу встречаются и известны с незапамятных времен измерения таких величин, как длина, объем, вес, время и др.

Потребность в измерениях возникла в незапамятные времена. Для этого в первую очередь использовались подручные средства. Например, в странах Ближнего Востока родилась единица веса драгоценных камней *карат*, что в переводе означает «семя боба», «горошина»; в Европе получила распространение единица аптекарского веса *гран*, что в переводе с латыни означает «зерно».

Древние вавилоняне установили год, месяц, час. Впоследствии $1/86\,400$ часть среднего периода обращения Земли вокруг своей оси (суток) получила название секунды.

В Вавилоне во II в. до н. э. время измерялось в *минах*. Мина равнялась промежутку времени (равному примерно двум астрономическим часам), за который из принятых в Вавилоне водяных часов вытекала «мина» воды, масса которой составляла около 500 г. Затем мина сократилась и превратилась в привычную для нас минуту. Со временем водяные часы уступили место песочным, а затем более сложным маятниковым механизмам.

В Двинской грамоте Ивана Грозного (1550 г.) регламентированы правила хранения и передачи размера новой меры сыпучих веществ — осьмины. Ее медные экземпляры рассылались по городам на хранение выборным людям — старостам, сотским, це-

ловальникам. С этих мер надлежало сделать клейменные деревянные копии для городских померщиков, а с тех, в свою очередь, — деревянные копии для использования в обиходе.

Метрологической реформой Петра I к обращению в России были допущены английские меры, получившие особенно широкое распространение на флоте и в кораблестроении, — футы, дюймы. В 1736 г. по решению Сената была образована Комиссия весов и мер под председательством главного директора Монетного двора графа М. Г. Головкина. В состав комиссии входил Леонард Эйлер. В качестве исходных мер комиссия изготовила медный аршин и деревянную сажень, за меру веществ было принято ведро московского Каменноостского питейного двора. Важнейшим шагом, подытожившим работу комиссии, было создание русского эталонного фунта.

Идея построения системы измерений на десятичной основе принадлежит французскому астроному Г. Мутону, жившему в XVII в. Позже было предложено принять в качестве единицы длины одну сорокамиллионную часть земного меридиана. На основе единственной единицы — метра строилась вся система, получившая название метрической.

В России указом «О системе Российских мер и весов» (1835 г.) были утверждены эталоны длины и массы — платиновая сажень и платиновый фунт.

В соответствии с международной Метрологической конвенцией, подписанной в 1875 г., Россия получила платиноиридиевые эталоны единицы массы № 12 и 26 и эталоны единицы длины № 11 и 28, которые были доставлены в новое здание Депо образцовых мер и весов. В 1892 г. управляющим Депо был назначен Д. И. Менделеев, которое он в 1893 г. преобразует в Главную палату мер и весов — одно из первых в мире научно-исследовательских учреждений метрологического профиля.

Метрическая система в России была введена в 1918 г. декретом Совета Народных Комиссаров «О введении Международной метрической системы мер и весов».

Развитие естественных наук привело к появлению все новых и новых средств измерений, а они, в свою очередь, стимулировали развитие наук, становясь все более мощным средством исследования.

Велико значение измерений в современном обществе. Они служат не только основой научно-технических знаний, но имеют

первостепенное значение для учета материальных ресурсов и планирования, для внутренней и внешней торговли, для обеспечения качества продукции, взаимозаменяемости узлов и деталей и совершенствования технологии, для обеспечения безопасности труда и других видов человеческой деятельности.

Ускорение научно-технического прогресса, темпов роста производительности труда, повышение качества продукции (надежности, экономичности, технологичности изделий) неразрывно связаны с увеличением объема экспериментальных работ и, соответственно, с объемом получаемой и перерабатываемой измерительной информации. Повышаются требования к экспериментальным исследованиям: необходимо сокращать сроки проведения опытных разработок, добиваться высокой точности измерений и результатов научно-исследовательских работ.

Измерение может осуществляться при наличии соответствующих технических средств и отработанной методики проведения измерений. В интересах всех стран измерения, где бы они ни выполнялись, должны быть согласованы, чтобы результаты измерений одинаковых величин, полученные в разных местах и с помощью различных измерительных средств, были бы воспроизводимы на уровне требуемой точности. Эти требования способны обеспечить стандартизация на международном, региональном и национальном уровнях.

Правовые основы стандартизации в Российской Федерации устанавливает Закон РФ «О техническом регулировании» от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ. Он обязателен для всех государственных органов управления, а также предприятий и предпринимателей, общественных объединений. В нем отражены меры государственной защиты интересов потребителей и государства путем разработки и применения нормативных документов по стандартизации.

В 1993 г. принята новая редакция комплекса государственных основополагающих стандартов «Государственная система стандартизации Российской Федерации (ГСС)».

ГСС устанавливает общие организационно-технические правила стандартизации в Российской Федерации. Положения стандартов ГСС применяют государственные органы управления, субъекты хозяйственной деятельности, научно-технические, инженерные общества и другие общественные объединения, в том числе *технические комитеты* (ТК) по стандартизации.

Неизбежные изменения и дополнения приближают систему стандартизации в РФ к международным правилам и учитывают реалии рыночной экономики. Полностью обновлены положения ГСС, касающиеся государственного контроля и надзора за соблюдением обязательных требований стандартов и правил сертификации. Определенные изменения в соответствии с рекомендациями *Международной организации по стандартизации (ИСО)* и *Международной электротехнической комиссии (МЭК)* внесены и в терминологию. Приближение правил отечественной стандартизации к международным отражено также в трактовке требований государственного стандарта (они разделены на обязательные для выполнения и рекомендательные). Исключены правила по установлению в стандартах требований к изготовителям о предоставлении гарантии. Следуя международному опыту, их относят к коммерческим, не подлежащим стандартизации, а оговариваемым в договорных отношениях.

Новая система стандартизации дает возможность участвовать в процессе создания стандарта всем заинтересованным сторонам: изготовителям продукции, потребителям, разработчикам проектов, представителям общественных организаций, отдельным специалистам и т. д.

Глава 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТРОЛОГИИ. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТИ

1.1. Определение и классификация измерений, методов и средств измерений. Единицы физических величин

Федеральный закон «Об обеспечении единства измерений» от 27.04.1993 осуществляет регулирование отношений, связанных с обеспечением единства измерений в Российской Федерации, в соответствии с Конституцией РФ.

Основные статьи Закона устанавливают:

- основные понятия, применяемые в Законе;
- организационную структуру государственного управления обеспечением единства измерений;
- нормативные документы по обеспечению единства измерений;
- единицы величин и государственные эталоны единиц величин;
- средства и методики измерений.

Закон определяет Государственную метрологическую службу и другие службы обеспечения единства измерений, метрологические службы государственных органов управления и юридических лиц, а также виды и сферы распределения государственного метрологического контроля и надзора.

Отдельные статьи Закона содержат положения по калибровке и сертификации средств измерений и устанавливают виды ответственности за нарушение Закона.

Становление рыночных отношений наложило отпечаток на статью Закона, которая определяет основы деятельности метро-

логических служб государственных органов управления и юридических лиц. Вопросы деятельности структурных подразделений метрологических служб на предприятиях стимулируются чисто экономическими методами.

В тех сферах, которые не контролируются государственными органами, создается *Российская система калибровки*, также направленная на обеспечение единства измерений. Госстандарт РФ назначил центральным органом Российской системы калибровки Управление технической политики в области метрологии.

Положение о лицензировании метрологической деятельности направлено на защиту прав потребителей и охватывает сферы, подлежащие государственному метрологическому контролю и надзору. Право выдачи лицензии предоставлено исключительно органам Государственной метрологической службы.

Закон создает условия для взаимодействия с международной и национальными системами измерений зарубежных стран. Это прежде всего необходимо для взаимного признания результатов испытаний, калибровки и сертификации, а также для использования мирового опыта и тенденций в современной метрологии.

Вопросами теории и практики обеспечения единства измерений занимается *метрология*. Метрология — наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности.

Метрология имеет большое значение для прогресса естественных и технических наук, так как повышение точности измерений — одно из средств совершенствования путей познания природы человеком, открытий и практического применения точных знаний.

Для обеспечения научно-технического прогресса метрология должна опережать в своем развитии другие области науки и техники, ибо для каждой из них точные измерения являются одним из основных путей их совершенствования.

Основными задачами метрологии являются:

- установление единиц физических величин, государственных эталонов и образцовых средств измерений;
- разработка теории, методов и средств измерений и контроля; обеспечение единства измерений;
- разработка методов оценки погрешностей, состояния средств измерения и контроля;

- разработка методик передачи размеров единиц от эталонов или образцовых средств измерений рабочим средствам измерений.

Измерением называется совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения измеряемой величины с ее единицей (сравнение) и получение значения этой величины. Измерения должны выполняться в общепринятых единицах.

Метрологическое обеспечение (МО) — установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений.

В перечень основных задач метрологического обеспечения в технике входят:

- определение путей наиболее эффективного использования научных и технических достижений в области метрологии;
- стандартизация основных правил, положений, требований и норм метрологического обеспечения;
- согласование приборов и методов измерения, проведение совместных измерений с помощью отечественной и зарубежной аппаратуры (интеркалибрация);
- определение рациональной номенклатуры измеряемых параметров, установление оптимальных норм точности измерений, порядка выбора и назначений средств измерений;
- организация и проведение метрологической экспертизы на стадиях разработки, производства и испытаний изделий;
- разработка и применение прогрессивных методов измерений, методик и средств измерений;
- автоматизация сбора, хранения и обработки измерительной информации;
- осуществление ведомственного контроля за состоянием и применением на предприятиях отрасли образцовых, рабочих и нестандартизованных средств измерений;
- проведение обязательных государственной или ведомственной проверок средств измерений, их ремонта;
- обеспечение постоянной готовности к проведению измерений;
- развитие метрологической службы отрасли и др.

Физическая величина — одно из свойств физического объекта (физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Единица измерения должна быть установлена для каждой из физических величин, при этом необходимо учитывать, что многие физические величины связаны между собой определенными зависимостями. Поэтому лишь часть физических величин и их единиц может определяться независимо от других. Такие величины называют *основными*. *Производная* физическая величина — физическая величина, входящая в систему физических величин и определяемая через основные физические величины этой системы.

Совокупность физических величин, образованная в соответствии с принятыми принципами, когда одни величины принимают за независимые, а другие определяют как функции независимых величин, называется *системой единиц физических величин*. Единица основной физической величины является *основной единицей* системы. Международная система единиц (система СИ; SI — от франц. *Systeme International* — The International System of Units) была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г.

В основу системы СИ положены семь основных и две дополнительные физические единицы. Основные единицы: метр, килограмм, секунда, ампер, кельвин, моль и кандела (табл. 1.1).

Метр — длина пути, проходимого светом в вакууме за интервал времени $1/299\,792\,458$ секунды.

Килограмм — единица массы, определяемая как масса международного прототипа килограмма, представляющего собой цилиндр из сплава платины и иридия.

Секунда равна $9\,192\,631\,770$ периодам излучения, соответствующего энергетическому переходу между двумя уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133.

Ампер — сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывал бы силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н (ньютон) на каждом участке проводника длиной 1 м.

Таблица 1.1. Единицы Международной системы СИ

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Основные единицы				
Длина	L	метр	m	м
Масса	M	килограмм	kg	кг
Время	T	секунда	s	с
Сила электрического тока	I	ампер	A	А
Температура	θ	кельвин	K	К
Количество вещества	N	моль	mol	моль
Сила света	J	кандела	cd	кд
Дополнительные единицы				
Плоский угол	—	радиан	rad	рад
Телесный угол	—	стерадиан	sr	ср

Кельвин — единица термодинамической температуры, равная $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды, т. е. температуры, при которой три фазы воды — парообразная, жидкая и твердая — находятся в динамическом равновесии.

Моль — количество вещества, содержащее столько же структурных элементов, сколько содержится в образце углерода-12 массой 0,012 кг.

Кандела — сила света в заданном направлении источника, испускающего монохроматическое излучение частотой $540 \cdot 10^{12}$ Гц, чья энергетическая сила излучения в этом направлении составляет $1/683$ Вт/ср (ср — стерадиан).

Дополнительные единицы системы СИ предназначены и используются для образования единиц угловой скорости, углового ускорения. К дополнительным физическим величинам системы СИ относят плоский и телесный углы.

Радиан (рад) — угол между двумя радиусами окружности, длина дуги которой равна этому радиусу. В практических случаях часто используют такие единицы измерения угловых величин:

градус — $1^\circ = 2\pi/360 \text{ рад} = 0,017453 \text{ рад}$;

минута — $1' = 1^\circ/60 = 2,9088 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$;

секунда — $1'' = 1'/60 = 1^\circ/3600 = 4,8481 \cdot 10^{-6} \text{ рад}$;

радиан — $1 \text{ рад} = 57^\circ 17' 45'' = 57,2961^\circ = (3,4378 \cdot 10^3)^\circ = (2,0627 \cdot 10^5)''$.

Стерadian (ср) — телесный угол с вершиной в центре сферы, вырезающий на ее поверхности площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы.

Производные единицы системы СИ образуют из основных и дополнительных единиц. Производные единицы бывают когерентными и некогерентными. *Когерентной* называют производную единицу величины, связанную с другими единицами системы уравнением, в котором числовой множитель — единица (например, скорость v равномерного прямолинейного движения связана с длиной пути l и временем t соотношением $v = l/t$). Остальные производные единицы — *некогерентные*. В табл. 1.2 приведены основные производные единицы.

Размерность физической величины — одна из важнейших ее характеристик, которую можно определить как буквенное выражение, отражающее связь данной величины с величинами, принятыми за основные в рассматриваемой системе величин. В табл. 1.2 для величин приняты следующие размерности: для длины — L , массы — M , времени — T , силы электрического тока — I . Размерности записывают прописными буквами и печатают прямым шрифтом.

Среди получивших широкое распространение внесистемных единиц отметим киловатт-час, ампер-час, градус Цельсия и т. д.

Сокращенные обозначения единиц, как международных, так и русских, названных в честь великих ученых, пишутся с заглавных букв; например ампер — А; ом — Ом; вольт — В; фарад — Ф. Для сравнения: метр — м, секунда — с, килограмм — кг.

Применение целых единиц не всегда удобно, так как в результате измерений получаются слишком большие или малые их значения. Поэтому в системе СИ установлены десятичные кратные и дольные единицы, которые образуются с помощью множителей. Десятичным множителям соответствуют приставки

Таблица 1.2. Производные единицы СИ

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение	
			международное	русское
Частота	T^{-1}	герц	Hz	Гц
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	джоуль	J	Дж
Сила, вес	LMT^{-2}	ньютон	N	Н
Мощность, поток энергии	L^2MT^{-3}	ватт	W	Вт
Количество электричества	TI	кулон	C	Кл
Электрическое напряжение, электродвижущая сила (ЭДС), потенциал	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	вольт	V	В
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	фарад	F	Ф
Электрическое сопротивление	$L^2MT^{-3}I^{-2}$	ом	Ω	Ом
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	сименс	S	См
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	тесла	T	Тл
Поток магнитной индукции	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Wb	Вб
Индуктивность, взаимная индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	H	Гн

(табл. 1.3), которые пишутся слитно с наименованием основной или производной единицы, например: километр (км), милливольт (мВ), мегагерц (МГц), наносекунда (нс).

Если физическая единица в целое число раз больше системной, она называется *кратной единицей*, например килогерц (10^3 Гц). *Дольная единица* физической величины — единица, меньшая системной в целое число раз, например, микрогенри (10^{-6} Гн).

Мерой физической величины или просто *мерой* называют средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных

Таблица 1.3. Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц СИ

Множитель	Приставка	Обозначение приставки	
		международное	русское
10^{18}	экса	E	э
10^{15}	пета	P	п
10^{12}	тера	T	т
10^9	гига	G	Г
10^6	мега	M	М
10^3	кило	k	к
10^2	гекто	h	г
10^1	дека	da	да
10^{-1}	деци	d	д
10^{-2}	санти	c	с
10^{-3}	милли	m	м
10^{-6}	микро	μ	мк
10^{-9}	нано	n	н
10^{-12}	пико	p	п
10^{-15}	фемто	f	ф
10^{-18}	атто	a	а

единицах и известны с необходимой точностью. Различают следующие разновидности мер:

- *однозначная мера* — мера, воспроизводящая физическую величину одного размера (например, гири 1 кг);
- *многозначная мера* — мера, воспроизводящая физическую величину разных размеров (например, штриховая мера длины);
- *набор мер* — комплект мер одной и той же физической величины, но разного размера, предназначенных для применения на практике, как в отдельности, так и в различных сочетаниях (например, набор концевых мер длины);
- *магазин мер* — набор мер, конструктивно объединенных в единое устройство, в котором имеются приспособления

для их соединения в различных комбинациях (например, магазин электрических сопротивлений).

Электроизмерительными приборами называют средства электрических измерений, предназначенные для выработки информации о значениях измеряемой величины, в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем, например амперметр, вольтметр, ваттметр, фазометр.

Измерительными преобразователями называют средства электрических измерений, предназначенные для выработки измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки или хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем. Измерительные преобразователи можно разделить на два вида:

- преобразователи электрических величин в электрические, например шунты, делители или усилители напряжения, трансформаторы;
- преобразователи неэлектрических величин в электрические, например термоэлектрические термометры, терморезисторы, тензорезисторы, индуктивные и емкостные преобразователи.

Электроизмерительная установка состоит из ряда средств измерений (мер, измерительных приборов, измерительных преобразователей) и вспомогательных устройств, расположенных в одном месте. При помощи таких установок можно в ряде случаев производить более сложные и более точные измерения, чем при помощи отдельных измерительных приборов. Электроизмерительные установки широко используются, например, для поверки и градуировки электроизмерительных приборов и испытаний различных материалов, используемых в электротехнических конструкциях.

Измерительные информационные системы представляют собой совокупность средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи. Они предназначены для автоматического получения, передачи и обработки измерительной информации от многих источников.

В зависимости от способа получения результата измерения делятся на прямые и косвенные.

Прямыми называются измерения, результат которых получается непосредственно из опытных данных. Примеры прямых из-

мерений: измерение тока амперметром, длины детали микрометром, массы на весах.

Косвенными называются измерения, при которых искомая величина непосредственно не измеряется, а ее значение находится на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной. Например, мощность P в цепях постоянного тока вычисляют по формуле $P = UI$, напряжение U в этом случае измеряют вольтметром, а ток I — амперметром.

В зависимости от совокупности приемов измерений все методы делятся на методы непосредственной оценки и методы сравнения.

Под *методом непосредственной оценки* понимают метод, по которому измеряемая величина определяется непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора прямого действия, т. е. прибора, осуществляющего преобразование измерительного сигнала в одном направлении (без применения обратной связи), например измерение тока амперметром. Метод непосредственной оценки прост, но отличается относительно низкой точностью.

Методом сравнения называют метод, по которому измеряемая величина сравнивается с величиной, воспроизводимой мерой. Отличительной чертой метода сравнения является непосредственное участие меры в процессе измерения, например измерение сопротивления путем сравнения его с мерой сопротивления — образцовой катушкой сопротивления, измерение массы на рычажных весах с уравновешиванием гири. Методы сравнения обеспечивают большую точность измерения, чем методы непосредственной оценки, но это достигается за счет усложнения процесса измерения.

1.2. Погрешности измерений

Измерение можно считать законченным, если найден не только результат измерения, но и проведена оценка его погрешности. В метрологии понятие «погрешность» является одним из центральных, причем в нем отражены понятия «погрешность результата измерения» и «погрешность средства измерения». Эти

два понятия близки друг к другу и обычно их классифицируют по одинаковым признакам.

Погрешностью результата измерения называют отличие найденного значения от истинного значения измеряемой величины. Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то при количественной оценке погрешности пользуются *действительным значением физической величины*. Это значение находится экспериментально и настолько близко к истинному значению в условиях поставленной измерительной задачи, что может быть использовано вместо него.

Погрешность средства измерения представляет собой разность между показаниями средства измерения и истинным (действительным) значением измеряемой физической величины. Она характеризует точность результатов измерений, проводимых используемым средством.

По форме количественного выражения погрешности делят на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютной погрешностью Δ , выражаемой в единицах измеряемой величины, называют отклонение результата измерения x_n от истинного значения x_n

$$\Delta = x - x_n \quad (1.1)$$

Разновидностью абсолютной погрешности является *предельная погрешность* Δ_m — погрешность, больше которой в данном измерительном эксперименте не может быть.

Абсолютная погрешность характеризует значение и знак полученной погрешности, но не определяет качество самого измерения. Характеристикой качества измерения является *точность измерения*, отражающая меру близости результата измерения к истинному значению измеряемой величины. Высокой точности измерений соответствует малая погрешность. Например, измерение силы тока в 10 и 100 А может быть выполнено с идентичной абсолютной погрешностью $\Delta = \pm 1$ А. Однако качество первого измерения хуже второго. Поэтому для сравнения качества измерений используют относительную погрешность.

Относительной погрешностью δ называют отношение абсолютной погрешности измерения к истинному значению измеряемой величины:

$$\delta = \Delta/x_n$$

Мерой точности измерений служит показатель, обратный модулю относительной погрешности: $K_r = 1/|\delta|$. Относительную погрешность δ часто выражают в процентах:

$$\delta = 100\Delta/x_n \text{ \%}.$$

Так как обычно $\Delta \ll x_n$, то относительная погрешность может быть определена как $\delta \approx \Delta/x$ или $\delta \approx 100\Delta/x \text{ \%}$.

Если измерение выполнено однократно и за абсолютную погрешность результата измерения Δ принята разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины x_n , то из (1.2) следует, что δ уменьшается с ростом x_n .

Приведенной погрешностью γ , характеризующей потенциальную точность измерений, называют отношение абсолютной погрешности Δ к некоторому нормирующему значению X_N (например, к конечному значению шкалы):

$$\gamma = 100 \frac{\Delta}{X_N} \text{ \%}. \quad (1.3)$$

По характеру (закономерности) проявления погрешности делят на три основных класса: систематические, случайные и грубые (промахи).

Систематические погрешности Δ_c — составляющие погрешности измерений, сохраняющиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при многократных измерениях величины в одних и тех же условиях. Такие погрешности выявляют детальным анализом их возможных источников и уменьшают введением соответствующей поправки, применением более точных приборов, калибровкой приборов с помощью рабочих мер и т. п. Систематическая погрешность данного средства измерений, как правило, будет отличаться от систематической погрешности другого экземпляра средства измерений этого же типа, из-за чего для группы однотипных средств измерений систематическая погрешность может иногда рассматриваться как случайная погрешность.

Случайные погрешности Δ_{cn} — составляющие погрешности измерений, зависящие от большого количества непредсказуемых факторов и изменяющиеся случайным образом по значению и знаку при повторных измерениях одной и той же физической величины в одних и тех же условиях. Данные погрешности проявляются при повторных измерениях одной и той же физической

величины в виде некоторого разброса получаемых результатов. Описание и оценка случайных погрешностей возможны только на основе теории вероятностей и математической статистики.

К случайным погрешностям можно отнести *погрешность считывания показаний*. Основную роль здесь играют *параллакс* и *ошибки интерполяции*. Параллакс — это кажущееся смещение рассматриваемого предмета из-за перемещения глаза наблюдателя (рис. 1.1).

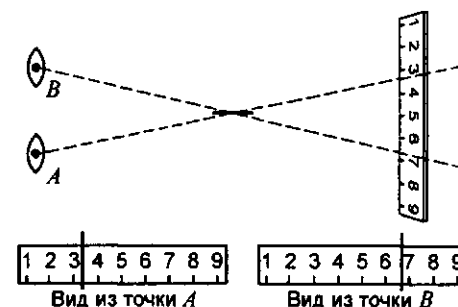


Рис. 1.1. Возникновение параллакса

Интерполяция — способ нахождения промежуточных значений величины по имеющемуся дискретному набору известных значений. Если стрелка измерительного устройства не попадает точно на деление шкалы, оператору для снятия отсчета приходится прибегать к интерполяции. При визировании из точки А отсчет может быть 3,3 либо 3,4, а при визировании из точки В возможны значения 6,7 либо 6,8.

Экспериментально установлено, что приведенная погрешность считывания показаний у щитовых электроизмерительных приборов классов 1; 2,5 и 4 составляет 0,45...0,6 %, а у образцовых лабораторных электроизмерительных приборов классов 0,2 и 0,5 составляет 0,1...0,12 %. Уменьшение погрешности считывания показаний у образцовых стрелочных приборов достигается за счет применения противопараллаксных устройств и увеличения количества промежуточных делений (у цифровых приборов погрешность считывания показаний практически отсутствует).

Общее выражение для вычисления погрешности считывания показаний: $\Delta = \Delta_z + \Delta_n + \Delta_{cn}$, где Δ_z — погрешность из-за ограниченной разрешающей способности зрения; Δ_n — погрешность от параллакса; Δ_{cn} — погрешность интерполяции.

При этом; $\Delta_3 = 0,07(X_k/l)$, где X_k — конечное значение шкалы прибора в единицах измеряемой величины; l — длина шкалы, мм; $\Delta_n = 0,055(X_k/l)$; $\Delta_\alpha = 0,1\alpha$, где α — цена деления шкалы.

Подставив эти значения, получим

$$\Delta = 0,07(X_k/l) + 0,055(X_k/l) + 0,1\alpha = 0,125(X_k/l) + 0,1\alpha.$$

В табл. 1.4 приведены данные по конкретным приборам М4202 класса 1,5, поверяемым приборами типа М2015 класса 0,2.

Таблица 1.4

Вид погрешности	Значение погрешности	
	Миллиамперметр М4204 класса 1,5 0—30 мА, цена деления 1 мА	Миллиамперметр М2015 класса 0,2 0—30 мА, цена деления 0,2 мА
Абсолютная погрешность из-за ограниченной разрешающей способности зрения Δ_3 , мА	$\pm 0,042$	$\pm 0,015$
Абсолютная погрешность от параллакса Δ_n , мА	$\pm 0,033$	0
Абсолютная погрешность интерполяции Δ_α , мА	$\pm 0,1$	$\pm 0,02$
Абсолютная погрешность считывания показаний Δ , мА	$\pm 0,175$	$\pm 0,035$
Приведенная погрешность считывания показаний δ , %	$\pm 0,583$	$\pm 0,117$

Оценим соотношение субъективных погрешностей считывания показаний при поверке методом сличения этих приборов, пользуясь данными таблицы. Погрешность считывания показаний для щитового прибора типа М4202 в 4,9 раза больше, чем для образцового прибора типа М2015. Наибольшая составляющая субъективной погрешности считывания показаний — погрешность интерполяции.

Грубые погрешности (промахи) — погрешности, существенно превышающие ожидаемые при данных условиях измерения. Они возникают из-за ошибок оператора или неучтенных внешних воздействий. В случае однократного измерения обнаружить про-

мах нельзя. При многократных наблюдениях промахи выявляют и исключают в процессе обработки результатов измерений.

Итак, если не учитывать промахи, абсолютную погрешность измерения Δ , определяемую выражением (1.1), представляют суммой систематической и случайной составляющих:

$$\Delta = \Delta_c + \Delta_{сл}. \quad (1.4)$$

Значит, абсолютная погрешность, как и результат измерения — случайная величина.

В зависимости от причин возникновения погрешности измерения подразделяют на методические, инструментальные, внешние и субъективные (личные).

Методические погрешности возникают из-за несовершенства метода измерений, неправильный выбор алгоритмов или формул, по которым производят обработку результатов измерений, из-за влияния выбранного средства измерения на измеряемые параметры сигналов и т. д.

Инструментальные (аппаратурные) погрешности возникают из-за несовершенства средств измерения. Уменьшают инструментальные погрешности применением более точного прибора.

Внешние погрешности связаны с выходом одной или нескольких влияющих величин (вибрация, наклон прибора, электромагнитные поля) за пределы допустимой области.

Субъективные погрешности вызваны ошибками оператора при отсчете показаний (погрешности от небрежности, усталости или невнимания оператора).

По характеру поведения измеряемой величины в процессе измерений различают статические и динамические погрешности.

Статические погрешности возникают при измерении установившегося во времени значения измеряемой величины.

Динамические погрешности имеют место при динамических измерениях, когда измеряемая физическая величина изменяется во времени. Причина появления динамических погрешностей состоит в несоответствии скоростных (временных) характеристик прибора и скорости изменения измеряемой величины, показания прибора отстают по времени от измеряемой величины. В цифровых измерительных устройствах основной вклад в динамическую погрешность вносит быстроедействие аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Цифровые приборы характеризуются

временем измерения, под которым понимают время с момента изменения измеряемой величины или начала цикла измерения до момента получения нового результата на отсчетном устройстве с нормированной погрешностью.

Под *временем установления* показаний электромеханического прибора понимается промежуток времени, прошедший с момента подключения или изменения измеряемой величины до момента, когда отклонение указателя от установившегося значения не превышает указанной в спецификации точности. Время установления показаний для большинства типов показывающих приборов не превышает 4 с.

Многие электромеханические устройства можно свести к системам, имеющим три основных элемента: массу m , пружину и демпфирующее устройство (рис. 1.2).

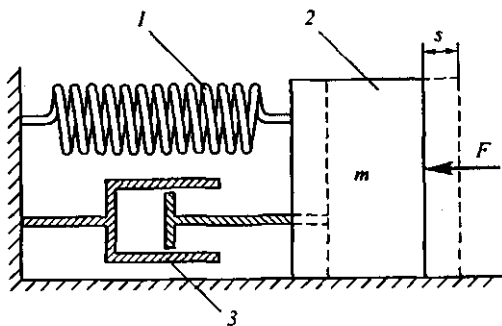


Рис. 1.2. Система с пружиной (1), массой (2) и демпфирующим устройством (3)

На рис. 1.3 показана реакция измерительного механизма на скачок измеряемой величины. Измерительный механизм из-за своей инерционности не может мгновенно переместиться в положение s_n , соответствующее значению измеряемой величины и попасть в интервал δs , который соответствует заданной точности измерения.

Правильный выбор параметров демпфирования позволяет сократить время установления. Если демпфирование системы недостаточно, она совершает затухающие колебания (кривая 2) около положения s_n , попадая в интервал δs через время t_2 с момента скачка измеряемой величины. Если торможение в демпфере избыточно (кривая 3), система с трудом преодолевает его и

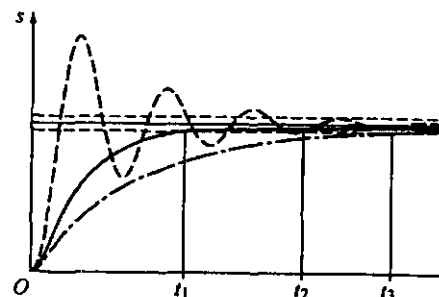


Рис. 1.3. Реакция системы на скачок измеряемой величины: 1 — оптимальное демпфирование; 2 — недостаточное демпфирование (возникновение аperiodических колебаний); 3 — избыточное демпфирование

попадает в интервал δs через время t_3 . При демпфировании, близком к оптимальному, время t_1 минимально (кривая 1).

По условиям эксплуатации средства измерений различают основную и дополнительную погрешности.

Основная погрешность средств измерений имеет место при нормальных условиях эксплуатации, оговоренных в регламентирующих документах.

Дополнительная погрешность средств измерений возникает из-за выхода какой-либо из влияющих величин за пределы нормальной области значений.

1.3. Систематические погрешности

В основу классификации систематических погрешностей положена закономерность их поведения во времени.

По характеру изменения во времени систематические погрешности разделяют на постоянные и переменные.

Постоянными называют такие систематические погрешности измерения, которые остаются неизменными (сохраняют величину и знак) в течение всей серии измерений.

Переменными называют погрешности, изменяющиеся в процессе измерения. Существенная переменная систематическая погрешность искажает оценки характеристик случайной погрешности. Поэтому она должна обязательно выявляться и исключаться из результатов измерений.

Результаты измерений, содержащие систематическую погрешность, относят к *неисправленным*. При измерениях стремятся исключить или учесть влияние систематических погрешностей. Однако вначале их надо обнаружить.

Постоянные систематические погрешности можно обнаружить только путем сравнения результатов измерений с другими, полученными с использованием более точных методов и средств измерения. В ряде случаев такие погрешности можно устранить специальными методами измерений.

Метод замещения обеспечивает наиболее полную компенсацию постоянной систематической погрешности. Суть данного метода состоит в такой замене измеряемой величины x_n известной величиной A , получаемой с помощью регулируемой меры, чтобы показание измерительного прибора сохранилось неизменным. Значение измеряемой величины считают в этом случае по указателю меры. При использовании данного метода погрешность измерительного прибора устраняется, а погрешность измерения зависит только от погрешности самой меры и погрешности отсчета измеряемой величины по указателю меры.

Погрешность меры — это разность между номинальным значением меры и действительным значением воспроизводимой ею величины.

Метод компенсации погрешности по знаку используют для устранения постоянной систематической погрешности, у которой в зависимости от условий измерения изменяется только знак. При этом методе выполняют два измерения, результаты которых должны быть равны $x_1 = x_n + \Delta_c$ и $x_2 = x_n - \Delta_c$, где x_n — измеряемая величина.

Среднее значение результатов $(x_1 + x_2)/2 = x_n$ представляет собой окончательный результат измерения, не содержащий погрешности $\pm \Delta_c$. Данный метод часто применяют при измерении экстремальных значений (максимума и минимума) неизвестной величины.

Метод введения поправок позволяет достаточно просто вычислить и исключить из результата измерения систематические погрешности. *Поправка C* — величина, одноименная с измеряемой x_n , вводимая в результат измерения $x = x_n + \Delta_c + C$ с целью исключения систематической погрешности. В случае $C = -\Delta_c$, систематическую погрешность полностью исключают из резуль-

тата измерения. Значения поправок определяют экспериментально или путем специальных теоретических исследований и задают в виде формул, графиков или таблиц.

Метод симметричных наблюдений весьма эффективен при выявлении и исключении систематической погрешности, являющейся линейной функцией соответствующего аргумента (амплитуды, напряжения, времени, температуры и т. д.). Положим, что измеряют физическую величину x_n , а результаты наблюдений x_i зависят от времени t . Для выявления характера изменения погрешности выполняют ряд наблюдений через равные промежутки времени Δt . Пусть выполнено пять наблюдений $x_1 \dots x_5$ в моменты времени $t_1 \dots t_5$. Вычислим средние арифметические значения двух пар наблюдений $(x_1 + x_5)/2$ и $(x_2 + x_4)/2$. Наблюдения в этих парах проведены в моменты t_1, t_5 и t_2, t_4 , симметричные относительно момента t_3 . При линейном характере изменения погрешности, полученные средние значения должны быть одинаковы. Убедившись в этом, результаты наблюдений запишем как $x_i = x_n + kt_i$, где k — некоторая постоянная. Пусть $x_1 = x_n + kt_1$ и $x_2 = x_n + kt_2$. Решение полученной системы из двух уравнений дает значение измеряемой величины x_n , свободное от переменной систематической погрешности, т. е.: $x_n = (x_2 t_1 - x_1 t_2)/(t_2 - t_1)$.

При измерениях всегда остаются *неисключенные систематические погрешности* (НСП). Порядок учета таких погрешностей рассмотрен ниже.

1.4. Случайные погрешности

Для удобства анализа предположим, что абсолютная погрешность результата измерений (1.4) является случайной, т. е. $\Delta = \Delta_{сл}$ и обозначается Δ .

Аналитически случайные погрешности измерений описывают и оценивают с помощью аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Наиболее общей характеристикой случайной величины (в данном случае случайной погрешности Δ) является *закон (функция) ее распределения*. Известны две формы описания этого закона: дифференциальная и интегральная.

Дифференциальным законом распределения случайной погрешности Δ или одномерной плотностью распределения вероятностей (плотностью вероятностей) случайной погрешности Δ называют функцию

$$p(\Delta) = \frac{dF(\Delta)}{d\Delta}, \quad (1.5)$$

где $dF(\Delta)$ — вероятность нахождения значений погрешности Δ в интервале $d\Delta$.

Интегральным законом распределения случайной погрешности Δ называют функцию $F(\Delta_r)$, выражающую вероятность P того, что случайная погрешность находится в интервале от $-\infty$ до некоторого значения, меньшего граничного Δ_r :

$$F(\Delta_r) = P(-\infty \leq \Delta \leq \Delta_r) = \int_{-\infty}^{\Delta_r} p(\Delta) d\Delta. \quad (1.6)$$

Функция $F(\Delta_r)$ неубывающая и определена так, что $F(-\infty) = 0$ и $F(\infty) = 1$. Интерес представляет поиск вероятности P , с которой погрешность измерений находится в заданном интервале погрешностей $(\Delta_{r1}, \Delta_{r2})$, где Δ_{r1} и Δ_{r2} — нижняя и верхняя границы этого интервала. Записывают вероятность как $P(\Delta_{r1} < \Delta < \Delta_{r2})$ и в общем случае $0 \leq P \leq 1$. Если $P = 0,6$ и выполнено 100 измерений, то считают, что 60 значений Δ попадают в интервал $(\Delta_{r1}, \Delta_{r2})$.

Для определения вероятности $P(\Delta_{r1} < \Delta < \Delta_{r2})$ можно использовать и интегральный и дифференциальный законы распределения, но чаще применяют дифференциальный

$$P(\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r2}) = \int_{\Delta_{r1}}^{\Delta_{r2}} p(\Delta) d\Delta, \quad (1.7)$$

так как он более наглядно описывает свойства случайной погрешности.

Вероятность нахождения погрешности на интервале всех возможных ее значений, т. е. на интервале $(-\infty, \infty)$ — $P(-\infty \leq \Delta \leq \infty) = 1$.

Часто необязательно описывать случайную погрешность с помощью законов распределения $p(\Delta)$, а достаточно охарактеризовать числами отдельные ее свойства. Такие числовые характе-

ристики называют моментами. Моменты называют начальными, если с их помощью усредняются величины, отсчитываемые от начала координат, и центральными, если усредняются величины, отсчитываемые от центра распределения.

Для рассматриваемых ниже симметричных законов $p(\Delta)$ применяется в основном центральный момент второго порядка, называемый дисперсией:

$$D = \int_{-\infty}^{\infty} \Delta^2 p(\Delta) d\Delta. \quad (1.8)$$

Дисперсия D характеризует рассеяние погрешностей относительно центра распределения $\Delta = 0$. Так как D имеет размерность квадрата погрешности, то обычно используют среднее квадратическое отклонение (СКО) $\sigma = \sqrt{D}$, которое имеет размерность самой погрешности.

При анализе погрешностей в практике электрических измерений чаще всего исходят из того, что погрешности распределяются или по нормальному закону (Гаусса), или равномерно, или по закону распределения Стьюдента.

Нормальный закон распределения погрешностей применяют при следующих предположениях:

- погрешность может принимать непрерывный ряд значений в интервале $\pm\infty$;
- при выполнении значительного числа наблюдений большие погрешности Δ появляются реже, чем малые, а частота появления погрешностей, идентичных по абсолютной величине и противоположных по знаку, одинакова.

Для нормального закона распределения

$$p(\Delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}}, \quad (1.9)$$

где σ — СКО погрешности характеризует точность измерений.

Чем σ меньше, тем выше точность измерений. Это следует из графиков функции (1.9) для разных σ (рис. 1.4). По мере уменьшения σ рассеяние случайных погрешностей Δ относительно центра их распределения, т. е. в данном случае относительно значения $\Delta = 0$, уменьшается. При нормальном законе распределения погрешностей формула расчета вероятности $P(\Delta_{r1} \leq \Delta \leq \Delta_{r2})$

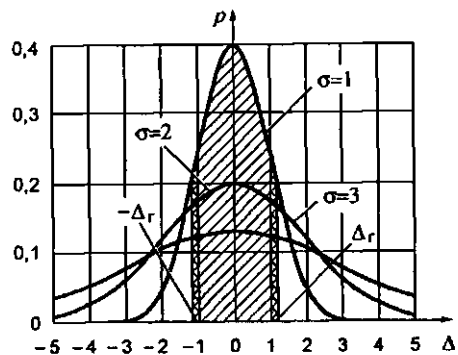


Рис. 1.4. Нормальный закон распределения

находится подстановкой (1.9) в (1.7). Для *симметричного* интервала, т. е. $\Delta_{r1} = -\Delta_r$ и $\Delta_{r2} = \Delta_r$:

$$P(-\Delta_r \leq \Delta \leq \Delta_r) = 2 \int_0^{\Delta_r} p(\Delta) d\Delta = \frac{2}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_0^{\Delta_r} e^{-\frac{\Delta^2}{2\sigma^2}} d\Delta. \quad (1.10)$$

На рис. 1.4 для конкретного значения СКО σ вероятность численно равна площади S заштрихованной фигуры, ограниченной функцией $p(\Delta)$, отрезком оси погрешностей Δ от $-\Delta_r$ до Δ_r и ординатами $p(-\Delta_r)$, $p(\Delta_r)$. Чем шире заданный интервал погрешностей $(-\Delta_r, \Delta_r)$, тем больше площадь S , т. е. выше вероятность попадания случайных погрешностей измерений Δ в этот интервал. Для интервала погрешностей $(-\infty, \infty)$ вероятность $P(-\infty < \Delta < \infty) = 1$.

Чтобы вычислить вероятность (1.10), удобнее в интеграле ввести новую переменную $t = \Delta/\sigma$. При этом его верхний предел интегрирования заменяется на $z = \Delta_r/\sigma$, а правая часть выражения (1.10) преобразуется в табулированный интеграл $\Psi(z)$, называемый *интегралом вероятностей*:

$$P(-z \leq t \leq z) = \Psi(z) = 2\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z e^{-\frac{t^2}{2}} dt. \quad (1.11)$$

Функция $\Phi(z)$, называемая *функцией Лапласа*, выражает вероятность попадания случайной величины t в интервал $(0, z)$. Значения функции $\Psi(z)$ приведены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Значения интеграла вероятностей $\Psi(z)$

z	$\Psi(z)$	z	$\Psi(z)$	z	$\Psi(z)$	z	$\Psi(z)$
0,00	0,000	0,70	0,516	1,40	0,839	2,25	0,976
0,10	0,080	0,80	0,576	1,50	0,866	2,50	0,988
0,20	0,159	0,90	0,632	1,60	0,890	2,75	0,994
0,30	0,236	1,00	0,683	1,70	0,911	3,00	0,9973
0,40	0,311	1,10	0,729	1,80	0,928	3,30	0,9990
0,50	0,383	1,20	0,770	1,90	0,943	3,50	0,9995
0,60	0,452	1,30	0,806	2,00	0,955	4,00	0,9999

Задавая границу Δ_r в значениях σ , находят $z = \Delta_r/\sigma$, а затем искомую вероятность по таблицам функции $\Psi(z)$. Можно выполнить и обратный поиск, т. е. по заданной вероятности $\Psi(z)$ найти z , далее $\Delta_r = z\sigma$ и интервал $(-\Delta_r, \Delta_r)$. По табл. 1.5 находят вероятности (1.10) для имеющих практическое значение интервалов погрешностей $(-\Delta_r, \Delta_r)$, представленных в σ :

$$P(-2\sigma/3 < \Delta < 2\sigma/3) = 0,500; \quad P(-\sigma < \Delta < \sigma) = 0,683;$$

$$P(-3\sigma < \Delta < 3\sigma) = 0,997.$$

В соответствии со значениями этих вероятностей погрешность результатов измерений, равная $(2/3)\sigma$, названа *равновероятной* (так как $P = 0,5$). Погрешность, равная 3σ , принята в радиотехнике за *максимальную* и ее записывают в виде $M = 3\sigma$. При $P = 0,997$ из тысячи выполненных измерений только три их погрешности Δ выходят за пределы интервала $(-3\sigma, 3\sigma)$.

При нормальном законе распределения случайной погрешности Δ_i за истинную величину $x_n = A$ принимают ее оптимальную оценку $\tilde{x} = \tilde{A}$, равную оценке \tilde{m}_1 , математического ожидания m_1 выполненного ряда наблюдений (x_1, x_2, \dots, x_n) , т. е. полагают, что $\tilde{x} = \tilde{A} = \tilde{m}_1$ — *результат измерения*:

$$\tilde{x} = \tilde{A} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (1.12)$$

Закон распределения Стьюдента применяют при обработке результатов небольшого числа ($2 \leq n < 20$) многократных наблюдений и он справедлив, когда плотность вероятности случайных погрешностей распределена по нормальному закону. Закон описывает распределение плотности вероятности $p(t_x)$ случайной величины

$$t_x = \Delta_x / \tilde{\sigma}_{\text{ср}} = (\bar{x} - x_n) / \tilde{\sigma}_{\text{ср}}, \quad (1.13)$$

где $\tilde{\sigma}_{\text{ср}}$ — оценка СКО результата измерения \bar{x} .

Интеграл вероятности для распределения Стьюдента

$$P(-t_r \leq t_x \leq t_r) | n = \int_{-t_r}^{t_r} p(t_x) | n dt_x = 2 \int_0^{t_r} p(t_x) | n dt_x. \quad (1.14)$$

Здесь $t_r = \pm \Delta_r / \tilde{\sigma}_{\text{ср}}$.

Параметр t_r в (1.14) называют коэффициентом Стьюдента. При расчетах погрешностей задают некоторую доверительную вероятность $P_d = P$ и число проводимых наблюдений n . Поэтому данный коэффициент обозначают через $t(P_d, n)$. Значения коэффициента приведены в табл. 1.6.

Таблица 1.6. Коэффициенты Стьюдента $t(P_d, n)$

n	$P_d = 0,5$	$P_d = 0,6$	$P_d = 0,7$	$P_d = 0,8$	$P_d = 0,9$	$P_d = 0,95$	$P_d = 0,98$	$P_d = 0,99$
2	1,00	1,38	1,96	3,08	6,31	12,71	31,82	63,66
3	0,82	1,06	1,34	1,89	2,92	4,30	6,97	9,93
4	0,77	0,98	1,25	1,64	2,35	3,18	4,54	5,84
5	0,74	0,94	1,19	1,53	2,13	2,78	3,75	4,60
6	0,73	0,92	1,16	1,48	2,02	2,62	3,37	4,03
7	0,72	0,91	1,13	1,44	1,94	2,45	3,14	3,71
8	0,71	0,90	1,12	1,42	1,90	2,37	3,00	3,50
9	0,71	0,89	1,11	1,40	1,86	2,31	2,90	3,36
10	0,70	0,88	1,10	1,38	1,83	2,26	2,82	3,25
16	0,69	0,87	1,07	1,34	1,75	2,13	2,60	2,95
25	0,69	0,86	1,06	1,32	1,71	2,06	2,49	2,80

1.5. Правила и формы представления результатов измерений

В целях единообразия отражения результатов и погрешностей измерений необходимо применять одностипные показатели точности измерений и формы представления результатов измерений.

Из-за широкого распространения многоразрядных цифровых приборов и электронных калькуляторов распространенной ошибкой при оценке результатов и погрешностей измерений является вычисление и запись с большим числом значащих цифр. Однако погрешности измерений не всегда требуется знать с очень высокой точностью. В частности, для технических измерений допустимой считается погрешность в 5...10 %. Так, вычислив значение погрешности 0,6273, при индикации результата измерения «12,7254», нет смысла записывать результат с таким количеством цифр. Ведь если исходить из того, что недостоверность результата уже характеризуется десятками долями (0,6...), то вклад последующих значащих цифр в погрешность будет все менее весомым. Поэтому и необходимо ограничивать число значащих цифр в записи результата измерения.

При записи наименьшие разряды числовых значений результата измерения и численных показателей точности должны быть одинаковы. В приведенном примере оценка погрешности должна быть записана как 0,62 или 0,6, а результат измерения — 12,72 или 12,7 соответственно. Расчет погрешностей округления показывает, что при округлении до двух значащих цифр она составляет не более 5 %, а при округлении до одной значащей цифры — не более 50 %. При этом характеристики погрешности оценивают приближенно; точность оценок согласовывают с целью измерения.

Правила округления результатов и погрешностей измерений:

- результат измерения округляют до того же десятичного знака, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности. Лишние цифры в целых числах заменяют нулями. Если десятичная дробь в числовом значении результата измерений оканчивается нулями, то нули отбрасывают до того десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение абсолютной погрешности;

- если цифра старшего из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остальные цифры числа не изменяют. Лишние цифры в целых числах заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают;
- если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна 5, но за ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю сохраняемую цифру увеличивают на единицу;
- если отбрасываемая цифра равна 5, а следующие за ней — неизвестны или нули, то последнюю сохраняемую цифру не изменяют, если она четная, и увеличивают на единицу, если она нечетная;
- погрешность результата измерения указывают *двумя* значащими цифрами, если первая из них равна 1 или 2, и *одной* — если первая цифра равна 3 или более;
- округление результатов измерений производят лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним-двумя лишними знаками.

На рис 1.5 представлен алгоритм округления результата измерения до трех значащих цифр.

Если руководствоваться этими правилами округления, то количество значащих цифр в числовом значении результата измерений дает возможность ориентировочно судить о точности измерения. Это связано с тем, что предельная погрешность, обу-

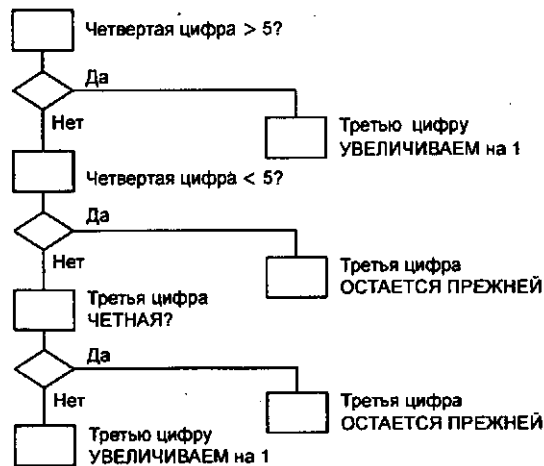


Рис. 1.5. Алгоритм округления до трех значащих цифр

словленная округлением, равна половине единицы последнего разряда числового значения результата измерения.

При измерениях в повседневной жизни повышенная точность не всегда нужна. Однако определенная информация о возможной инструментальной составляющей погрешности измерения необходима и поэтому она должна быть каким-либо образом отражена. Такая информация содержится в указании класса точности средства измерения.

Класс точности — обобщенная характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливают в соответствующих стандартах.

Класс точности средств измерений характеризует их свойства в отношении точности, но не является непосредственным показателем точности измерений, выполненных с помощью этих средств.

Классы точности присваивают средствам измерений при сертификации на основании исследований и испытаний представительной партии таких устройств. Обычно их устанавливают в технических условиях на средство измерения и соответствующий значок наносят на шкалу или корпус прибора. Например, классу точности «1.5» соответствует значок $\textcircled{1.5}$.

1.6. Характеристики электроизмерительных приборов

Общими характеристиками электроизмерительных приборов являются их погрешности, вариация показаний, чувствительность к измеряемой величине, потребляемая мощность, время установления показаний и надежность.

Вариация показаний прибора — это наибольшая разность показаний прибора при одном и том же значении измеряемой величины. Она определяется при плавном подходе стрелки к испытуемой отметке шкалы при движении ее один раз от начальной, а второй раз от конечной отметок шкалы. Вариация показаний характеризует степень устойчивости показаний прибора при одних и тех же условиях измерения одной и той же величины. Она приближенно равна удвоенной погрешности от трения, так

как причиной вариации в основном является трение в опорах подвижной части.

Чувствительностью S электроизмерительного прибора к измеряемой величине x называется производная от перемещения указателя a по измеряемой величине x .

$$S = da/dx = F(x). \quad (1.15)$$

Понятие чувствительности не распространяется на цифровые приборы.

Перемещение указателя a , которое выражается в делениях или миллиметрах шкалы, для обширной группы приборов определяется, в первую очередь, углом отклонения подвижной части α измерительного механизма. Кроме того, оно зависит от типа отсчетного устройства и его характеристик (стрелочный или световой указатель, длина шкалы, число делений шкалы и др.).

Выражением (1.15) определяется чувствительность прибора в данной точке шкалы. Если чувствительность постоянна, т. е. не зависит от измеряемой величины, то ее можно определить из выражения

$$S = a/x.$$

В этом случае чувствительность прибора численно равна перемещению указателя, соответствующему единице измеряемой величины.

У приборов с постоянной чувствительностью перемещение указателя пропорционально измеряемой величине, т. е. шкала прибора равномерна.

Чувствительность прибора имеет размерность, зависящую от характера измеряемой величины, поэтому, когда пользуются термином «чувствительность», говорят «чувствительность прибора к току», «чувствительность прибора к напряжению» и т. д. Например, чувствительность вольтметра к напряжению равна 10 дел./В.

Величина, обратная чувствительности, $C = 1/S$ называется ценой деления (постоянной) прибора. Она равна числу единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы. Например, если $S = 10$ дел./В, то $C = 0,1$ В/дел.

Под надежностью электроизмерительных приборов понимают способность их сохранять заданные характеристики при определенных условиях работы в течение заданного времени. Если значение одной или нескольких характеристик прибора выходит

из заданных предельных значений, то говорят, что имеет место отказ. Количественной мерой надежности является минимальная вероятность безотказной работы прибора в заданных промежуток времени и условиях работы.

Вероятностью безотказной работы называется вероятность того, что в течение определенного времени T непрерывной работы не произойдет ни одного отказа. Время безотказной работы указано в описаниях приборов. Часто пользуются приближенным значением этого показателя, определяемым отношением числа приборов, продолжающих после определенного времени T безотказно работать, к общему числу испытываемых приборов.

Например, для вольтметров типа ВЗ-59 минимальное значение вероятности безотказной работы равно 0,96 за 2000 ч. Следовательно, вероятность того, что прибор данного типа сохранит заданные характеристики после 2000 ч работы, составляет не менее 0,96, иными словами, из 100 приборов данного типа после работы в течение 2000 ч, как правило, не более четырех приборов будут нуждаться в ремонте.

К показателям надежности относят также среднее время безотказной работы прибора, которое определяется как среднее арифметическое время исправной работы каждого прибора. Обычно, когда приборы начинают выпускать серийно, некоторая небольшая часть их отбирается для испытаний на надежность. Показатели надежности, определенные по результатам этих испытаний, присваивают всей серии приборов.

Гарантийным сроком называют период времени, в течение которого завод-изготовитель гарантирует исправную работу изделия при соблюдении правил эксплуатации прибора.

Контрольные вопросы

1. Что такое «измерение»?
2. Для чего применяются дольные и кратные единицы измерения?
3. Как вычисляется абсолютная погрешность?
4. Как изменится параллакс, если увеличить расстояние от стрелки измерительного прибора до шкалы?
5. Из-за чего возникает динамическая погрешность?

Глава 2

ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ. МЕРЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

2.1. Обеспечение единства измерений

Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ) — комплекс установленных стандартами взаимоувязанных правил, положений, требований и норм, определяющих организацию и методику проведения работ по оценке и обеспечению точности измерений. Требования ГСИ изложены в ГОСТ Р 8.000—2000.

Единство измерений — состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах величин и погрешности измерений не выходят за установленные границы с заданной вероятностью.

Средство измерений (СИ) — техническое средство, используемое при измерениях и имеющее нормированные метрологические свойства.

Средства измерений различаются:

- по метрологическому назначению — на рабочие и метрологические;
- по конструктивному исполнению — на меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы и измерительные комплексы;
- по уровню автоматизации — на неавтоматические, автоматизированные и автоматические;

- по уровню стандартизации — на стандартные и нестандартные;
- по отношению к измеряемой величине — на основные и вспомогательные.

Правовой основой обеспечения единства измерений служит свод государственных актов и нормативно-технических документов различного уровня, регламентирующих метрологические правила, требования и нормы.

Технической основой ГСИ являются:

1. Система (совокупность) государственных эталонов единиц и шкал физических величин — эталонная база страны.
2. Система передачи размеров единиц и шкал физических величин от эталонов ко всем СИ с помощью эталонов и других средств поверки.
3. Система разработки, постановки на производство и выпуска в обращение рабочих СИ, обеспечивающих исследования, разработки, определение с требуемой точностью характеристик продукции и технологических процессов.
4. Система государственных испытаний СИ (утверждение типа СИ), предназначенных для серийного производства в России или массового ввоза из-за границы.
5. Система государственной и ведомственной метрологической аттестации, поверки и калибровки СИ.
6. Система стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов.
7. Система стандартных справочных данных о физических константах и свойствах веществ и материалов.

Различают децентрализованное и централизованное воспроизведение единиц.

При децентрализованном воспроизведении единицы воспроизводятся там, где выполняются измерения.

При централизованном воспроизведении информация о единицах передается с места их централизованного хранения и воспроизведения. Оно осуществляется с помощью специальных технических средств, называемых эталонами.

Основные единицы (секунда, метр, килограмм, кельвин, кандела, ампер и моль) воспроизводятся только централизованно.

Эталон единицы величины — средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения единицы величины (или кратных либо дольных значений единицы величины) с целью пе-

передачи ее размера другим средствам измерений данной величины.

От эталона единица величины передается разрядным эталонам, а от них — рабочим средствам измерений.

Эталоны классифицируют на первичные, вторичные и рабочие.

Первичный эталон — это эталон, воспроизводящий единицу физической величины с наивысшей точностью, возможной в данной области измерений на современном уровне научно-технических достижений. Первичный эталон может быть национальным (государственным) и международным.

Государственный эталон единицы величины — эталон единицы величины, признанный решением уполномоченного на то государственного органа в качестве исходного на территории Российской Федерации.

Международные эталоны хранит и поддерживает Международное бюро мер и весов (МБМВ). Важнейшая задача деятельности МБМВ состоит в систематических международных сличениях национальных эталонов крупнейших метрологических лабораторий разных стран с международными эталонами, а также и между собой, что необходимо для обеспечения достоверности, точности и единства измерений как одного из условий международных экономических связей.

Сличению подлежат как эталоны основных величин системы СИ, так и производных. Установлены определенные периоды сличения. Например, эталоны метра и килограмма сличают каждые 25 лет, а электрические и световые эталоны — один раз в 3 года.

Первичному эталону соподчинены вторичные и рабочие (разрядные) эталоны. Размер воспроизводимой единицы вторичным эталоном сличается с государственным эталоном.

Вторичные эталоны (их иногда называют «эталон-копии») могут утверждаться либо Госстандартом РФ, либо государственными научными метрологическими центрами, что связано с особенностями их использования.

Рабочие эталоны воспринимают размер единицы от вторичных эталонов и, в свою очередь, служат для передачи размера менее точному рабочему эталону (или эталону более низкого разряда) и рабочим средствам измерений.

Каждый эталон состоит из воспроизводящей части и приспособлений или устройств, обеспечивающих съём и передачу информации о размере единицы. Правильность и точность заложенной в средства измерений информации о размере единиц усугубляется при утверждении типа средств измерений. Сохранность этой информации контролируется при первичной и всех последующих поверках средств измерений.

Использование для градуировки, аттестации и поверки средств измерений непосредственно государственных эталонов не допускается. Эти эталоны являются национальным достоянием, ценностями особой государственной важности.

По государственным эталонам устанавливаются значения физических величин вторичных эталонов. Среди вторичных эталонов различают: эталоны-свидетели, предназначенные для проверки сохранности государственного эталона и замены его в случае порчи или утраты; эталоны сравнения, применяемые для сличения эталонов, которые по тем или иным причинам не могут быть непосредственно сличены друг с другом; эталоны-копии, используемые для передачи информации о размере рабочим эталонам.

На рис. 2.1 приведен один из вариантов схемы передачи информации о размере единицы от государственного эталона к средствам измерений, из которой видно, что от вторичных эталонов информацию о размере единицы получают нижестоящие эталоны (1-, 2-, 3- и 4-го разрядов) и рабочие средства измерений.

Не допускается использование рабочих средств измерений для передачи информации о размере единицы другим средствам измерений.

Количество ступеней от рабочего эталона до средства измерений зависит от требуемой точности передачи размера единицы и особенностей данной единицы. Известно, что на каждой ступени передачи информации точность теряется в 3...5 раз (иногда в 1,25...10 раз).

Таким образом, при многоступенчатой передаче эталонная точность не доходит до потребителя. Поэтому для высокоточных средств измерений число ступеней может быть сокращено вплоть до передачи им информации о размере единицы непосредственно от эталона-копии.

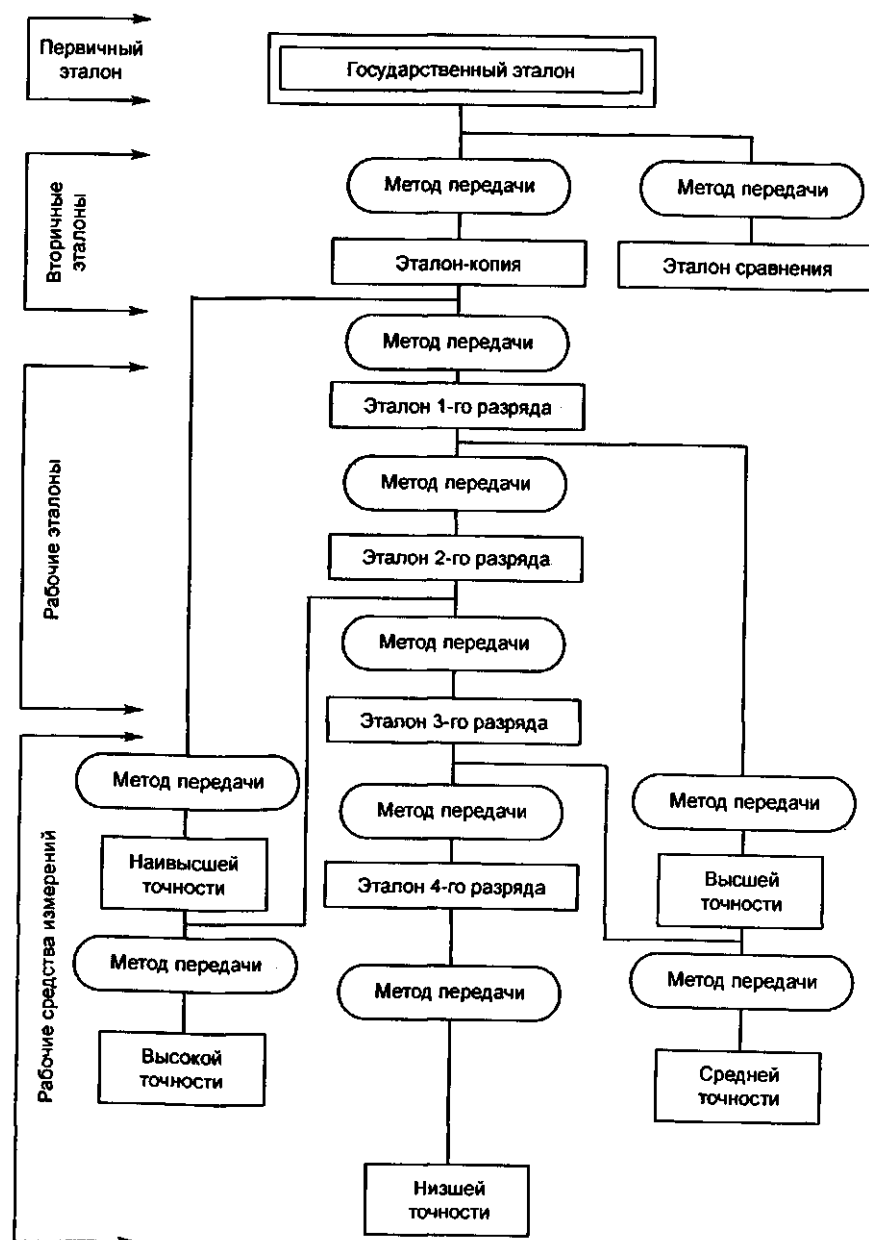


Рис. 2.1. Общий вид государственной поверочной схемы

2.2. Поверка средств измерений

Поверка средств измерений — совокупность операций, выполняемых органами государственной метрологической службы (другими уполномоченными на то органами, организациями) с целью определения и подтверждения соответствия средства измерения установленным обязательным требованиям.

Средства измерений, подлежащие метрологическому контролю и надзору, подвергаются поверке при выпуске из производства или ремонта, при ввозе по импорту, при продаже и выдаче на прокат, а также при эксплуатации.

Правилами ПР 50.2.006—94 «ГСИ. Поверка средств измерений. Организация и порядок проведения» установлено, что поверку средств измерений осуществляют органы государственной метрологической службы (ГМС), государственные научные метрологические центры (ГНМЦ), а также аккредитованные метрологические службы юридических лиц.

Поверка проводится физическим лицом, аттестованным в качестве поверителя в соответствии с правилами ПР 50.2.012—94 «ГСИ. Порядок аттестации поверителей средств измерений», по нормативным документам, утверждаемым по результатам испытаний с целью утверждения типа. Если средство измерений по результатам поверки признано пригодным к применению, то на него и (или) техническую документацию наносится оттиск поверительного клейма и (или) выдается «Свидетельство о поверке». Если по результатам поверки средство измерений признано не пригодным к применению, оттиск поверительного клейма и (или) «Свидетельство о поверке» аннулируются и выписывается «Извещение о непригодности» или делается соответствующая запись в технической документации.

Существуют следующие виды поверок:

- *Первичная поверка* — проводится для средств измерений утвержденных типов при выпуске их из производства, после ремонта, при ввозе из-за границы. При утверждении типа средств измерений единичного производства на каждое из них оформляется сертификат об утверждении типа; первичную поверку данные средства измерений не проходят.
- *Периодическая поверка* проводится для средств измерений, находящихся в эксплуатации, через определенные межповерочные интервалы. Необходимость поверки обусловлена

возможностью утраты измерительным средством метрологических показателей из-за временных и других воздействий.

Периодичность поверки зависит от временной нестабильности метрологических характеристик (метрологической надежности), интенсивности эксплуатации и важности результатов, получаемых с помощью средств измерений.

Существует рекомендация ВНИИМС — МИ2273—93 «ГСИ. Области использования средств измерений, подлежащих поверке», согласно которой первый межповерочный интервал устанавливается при утверждении типа. Корректировка межповерочных интервалов с учетом специфики применения средств измерений производится в соответствии с методическими материалами МИ 1872—88 «ГСИ. Межповерочные интервалы образцовых средств измерений. Методика определения и корректировки», а также МИ 218—92 «ГСИ. Межповерочные и межкалибровочные интервалы средств измерений. Методика определения».

- *Внеочередная поверка* проводится: при необходимости подтверждения пригодности средств измерений к применению; в случае применения средства измерений в качестве комплектующего по истечении половины межповерочного интервала; в случае повреждения клейма или утери свидетельства о поверке; при вводе в эксплуатацию после длительной консервации (более одного межповерочного интервала); при отправке средств измерений потребителю после истечения половины межповерочного интервала.
- *Экспертная поверка* проводится при возникновении разногласий по вопросам, относящимся к метрологическим характеристикам, исправности средств измерений и пригодности их к применению.
- *Инспекционная поверка* выполняется в рамках государственного надзора или ведомственного контроля, для контроля качества первичных или периодических поверок и определения пригодности средств измерений к применению.

2.3. Калибровка средств измерений

В настоящее время в Российской Федерации с переходом к рынку возникла необходимость поиска новых форм организации метрологической деятельности, которые соответствовали бы ры-

ночным отношениям в экономике. Одной из таких форм является организация Российской системы калибровки (РСК), схема которой приведена на рис. 2.2.

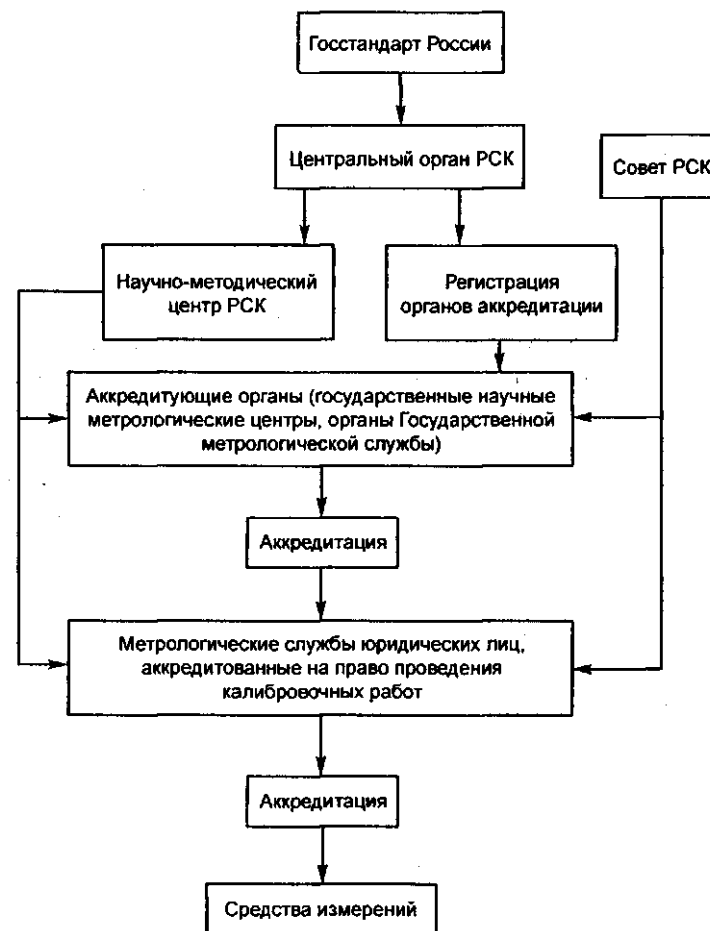


Рис. 2.2. Схема Российской службы калибровки

Контроль средств измерений на предмет их пригодности к применению в мировой практике осуществляется двумя основными «видами»: поверкой и калибровкой.

Калибровка средств измерений — это совокупность операций, выполняемых калибровочной лабораторией с целью опре-

деления и подтверждения действительных значений метрологических характеристик и (или) пригодности средств измерений к применению в сферах, не подлежащих государственному метрологическому контролю и надзору в соответствии с установленными требованиями.

Результаты калибровки средств измерений удостоверяются калибровочным знаком, наносимым на средства измерений, или сертификатом о калибровке, а также записью в эксплуатационных документах.

Поверку (обязательная госповерка) может выполнять, как правило, орган государственной метрологической службы, а калибровку — любая аккредитованная и не аккредитованная организация.

Поверка обязательна для средств измерений, применяемых в сферах, подлежащих Государственному метрологическому контролю (ГМК), калибровка же — процедура добровольная, поскольку относится к средствам измерений, не подлежащим ГМК. Предприятие вправе самостоятельно решать вопрос о выборе форм и режимов контроля состояния средств измерений, за исключением тех областей применения средств измерений, за которыми государства всего мира устанавливают свой контроль — это здравоохранение, безопасность труда, экология и др.

Освободившись от государственного контроля, предприятия попадают под не менее жесткий контроль рынка. Это означает, что свобода выбора предприятия по «метрологическому поведению» является относительной, все равно необходимо соблюдать метрологические правила.

В развитых странах устанавливает и контролирует исполнение этих правил негосударственная организация, именуемая «национальной калибровочной службой». Эта служба берет на себя функции регулирования и разрешения вопросов, связанных со средствами измерений, не подпадающими под контроль государственных метрологических служб.

Желание иметь конкурентоспособную продукцию побуждает предприятия иметь измерительные средства, дающие достоверные результаты.

Внедрение системы сертификации продукции дополнительно стимулирует поддержание измерительных средств на соответствующем уровне. Это согласуется с требованиями систем качества, регламентируемыми стандартами ИСО серии 9000.

Построение Российской системы калибровки (РСК) основывается па следующих принципах: добровольность вступления; обязательность получения размеров единиц от государственных эталонов; профессионализм и компетентность персонала; самокупаемость и самофинансирование.

Основное звено РСК — калибровочная лаборатория. Она представляет собой самостоятельное предприятие или подразделение в составе метрологической службы предприятия, которое может осуществлять калибровку средств измерений для собственных нужд или для сторонних организаций. Если калибровка проводится для сторонних организаций, то калибровочная лаборатория должна быть аккредитована органом РСК. Аккредитацию осуществляют государственные научные метрологические центры или органы Государственной метрологической службы в соответствии со своей компетенцией и требованиями, установленными в ГОСТ 51000.2—95 «Общие требования к аккредитуемому органу».

Порядок аккредитации метрологической службы утвержден постановлением Госстандарта РФ от 28 декабря 1995 г. № 95 «Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право проведения калибровочных работ».

2.4. Методы поверки (калибровки) и поверочные схемы

Допускается применение четырех методов поверки (калибровки) средств измерений: непосредственное сличение с эталоном; сличение с помощью *компаратора* (устройства сравнения); прямые измерения величины; косвенные измерения величины. Некоторые методы поверки представлены на рис. 2.3.

Метод непосредственного сличения поверяемого (калибруемого) средства измерения с эталоном соответствующего разряда широко применяется для различных средств измерений в таких областях, как электрические и магнитные измерения, для определения напряжения, частоты и силы тока. В основе метода лежит проведение одновременных измерений одной и той же физической величины поверяемым (калибруемым) и эталонным приборами. При этом определяют погрешность как разницу по-

- локальные поверочные схемы предназначены для метрологических служб министерств (ведомств) и юридических лиц. Все локальные поверочные схемы должны соответствовать требованиям соподчиненности, которая определена государственной поверочной схемой. Государственные поверочные схемы разрабатываются научно-исследовательскими институтами Госстандарта РФ, держателями государственных эталонов. Локальная поверочная схема уточняет требования государственной схемы применительно к специфике данного ведомства. Она обеспечивается рабочими эталонами.

Государственные поверочные схемы утверждаются Госстандартом РФ, а локальные — ведомственными метрологическими службами или руководством предприятия.

2.5. Сертификация средств измерений

В соответствии с законом РФ «О сертификации продукции и услуг» в России создана Система сертификации средств измерений, которая предусматривает добровольный характер сертификации и удостоверяет соответствие измерительных средств заявителей метрологическим правилам и нормам ГОСТ Р.

При организации Системы принимались во внимание и в большой степени учитывались нормативные документы международных организаций:

- Системы сертификатов МОЗМ — *OIML (International Organization of Legal Metrology)*. Международная организация законодательной метрологии насчитывает 37 стран-членов и 8 стран-корреспондентов. В задачи этой организации входят создание центра документации и информации о национальных метрологических службах и унификация метрологических правил, устанавливаемых и контролируемых правительственными органами;
- ИСО — *ISO (International Organization for Standardization)* «Международная организация по стандартизации» основана в 1947 г. для разработки международных стандартов в различных областях техники, производственной и других видах деятельности;
- МЭК — Международная электротехническая комиссия;

- ИЛАК — *ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation)* «Международная организация по сотрудничеству в области аккредитации лабораторий». Была организована в 1977 г., сначала как неформальная конференция, и совсем недавно (1996 г.) в качестве официальной организации сотрудничества между органами по аккредитации лабораторий с участием органов, лабораторий и других заинтересованных сторон в качестве учредителей.

Аккредитация испытательной лаборатории — процедуры, посредством которой уполномоченный орган официально признает возможность выполнения испытательной лабораторией работ в заявленной области.

Сертификацию средств измерений осуществляют аккредитованные органы по сертификации средств измерений с учетом результатов испытаний, проведенных аккредитованными на техническую компетентность и независимость испытательными лабораториями (центрами). Проведение испытаний в лабораториях (центрах), аккредитованных только на техническую компетентность, допускается при наличии лицензионного соглашения с органом по сертификации, который в таких ситуациях несет ответственность за объективность и достоверность результатов. Аккредитацию органов по сертификации проводит центральный орган системы.

2.6. Классификация мер

В зависимости от степени точности и области применения меры подразделяются на *эталоны, образцовые и рабочие меры*. Эталоном называют средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы физической величины для передачи ее размера другим средствам измерений.

В зависимости от точности воспроизведения единицы и назначения эталоны подразделяются на первичные, обеспечивающие воспроизведение единицы с наивысшей достижимой в стране точностью, и вторичные, значение которых устанавливается по первичному эталону. Вторичные эталоны обычно являются рабочими эталонами и предназначены для поверки образцовых средств измерения.

Образцовые меры предназначены для поверки и градуировки рабочих мер и измерительных приборов. Они могут быть также непосредственно использованы для точных измерений. В зависимости от точности образцовые меры подразделяются на три разряда. Образцовые меры первого разряда наиболее точные. Они поверяются непосредственно по рабочим эталонам. Образцовые меры второго разряда поверяются по образцовым мерам первого разряда и т. д.

Рабочие меры выпускаются в широком диапазоне номинальных значений величин и используются для поверки измерительных приборов и для измерений на промышленных предприятиях и в научных организациях.

2.7. Меры единиц электрических величин

Меры ЭДС. В качестве мер ЭДС, как образцовых, так и рабочих, применяются нормальные элементы Вестона различных классов точности и стандарты вольт на основе эффекта Джоузефсона.

Нормальные элементы представляют собой специальные гальванические элементы, ЭДС которых точно известна. Различают нормальные элементы с насыщенным и ненасыщенным раствором сернокислого кадмия. У элементов с насыщенным раствором ЭДС значительно стабильнее во времени, чем у элементов с ненасыщенным раствором. Преимущество элементов с ненасыщенным раствором заключается в меньшем внутреннем сопротивлении (около 300 Ом) и в очень малом температурном коэффициенте.

Насыщенный нормальный элемент состоит из запаянного стеклянного сосуда H-образной формы, в нижние концы которого впаяны платиновые проводники (рис. 2.4). Положительным электродом 1 служит ртуть, заполняющая нижнюю часть одной ветви сосуда, отрицательным электродом 5 — амальгама кадмия, расположенная в нижней части другой ветви сосуда. Над ртутью расположен слой пасты 2 из смеси сернокислой ртути (Hg_2SO_4) и сернокислого кадмия ($CdSO_4$). Паста является деполяризатором. Электролитом 4 служит насыщенный раствор сернокислого кад-

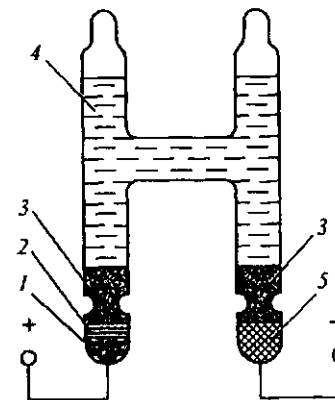


Рис. 2.4. Нормальный элемент: 1 — ртуть; 2 — сернокислая ртуть; 3 — сернокислый кадмий; 4 — насыщенный раствор сернокислого кадмия; 5 — амальгама кадмия

мия. Насыщение раствора обеспечивается кристаллами сернокислого кадмия 3, помещенными поверх электродов.

Свойства нормальных элементов определяются ГОСТ 1954—82 и сведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Тип н.э.	Класс точности &	Значение ЭДС при температуре 20 °С, В		Отклонение э.д.с. за 1 год, мкВ, не более	Температура в условиях применения, °С	
		при выпуске	при эксплуатации		лабораторных	рабочих
Насыщенный	0,0002	От 1,018590 до 1,018700	От 1,018540 до 1,018730	±2	20 ± 0,2	20 ± 0,5
	0,0005			±5	20 ± 0,5	20 ± 1
	0,001			±10	20 ± 1	20 ± 2
	0,002			±20	20 ± 2	20 ± 5
	0,005			±50	20 ± 5	20 ± 10
Ненасыщенный	0,002	От 1,019000 до 1,019600	От 1,018800 до 1,019600	±20	20 ± 1	20 ± 4
	0,005			±50	20 ± 2	20 ± 10
	0,01			±100	20 ± 5	20 ± 15
	0,02			±200	20 ± 10	20 ± 30

Нормальные элементы нельзя трясти и опрокидывать, они должны быть защищены от действия сильных источников света и тепла. Хранить их необходимо при возможно более постоянной температуре. Внешний вид элементов показан на рис. 2.5.

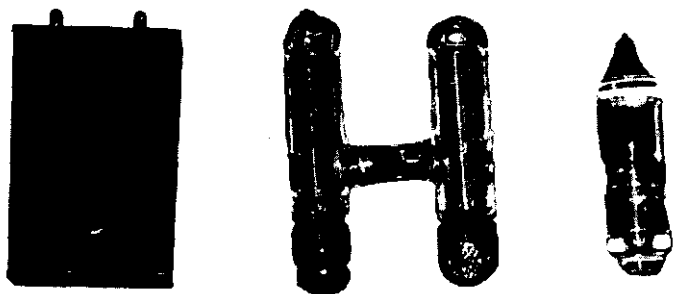


Рис. 2.5. Промышленные образцы нормальных элементов

В настоящее время наиболее высокая точность измерения физических величин имеет место для частоты и достигает значения 10^{-14} , в то время как существующий стандарт вольты на элементах Вестона имеет точность лишь на уровне 10^{-6} . Резкое повышение точности воспроизведения напряжения 1 В стало возможным в стандартах вольты на основе эффекта Джозефсона. Стандарт вольты на одном джозефсоновском элементе дает выходное напряжение V порядка 1 мВ. При использовании цепочки из $N \approx 1500$ последовательно включенных туннельных джозефсоновских переходов был реализован стандарт вольты с выходным напряжением 1 В и точностью воспроизведения этого напряжения 10^{-10} .

Теория сверхпроводимости Бардина — Купера — Шриффера объясняет, почему при сверхнизких температурах электрическое сопротивление ряда веществ падает практически до нуля, так что электрический ток может циркулировать в них без потерь очень долго. В основе этого механизма лежит спаривание электронов по Куперу: электроны с противоположно направленным спином объединяются в пары и практически перестают испытывать сопротивление со стороны проводника, в отличие от одиночных электронов, обеспечивающих электропроводность в обычных условиях.

В 1962 г. Брайан Джозефсон, будучи тогда всего лишь студентом старшекурсником, сообразил, что два сверхпроводящих

слоя, разделенные ничтожно тонкой прослойкой изолятора всего в несколько атомов толщиной, будут вести себя как единая система. Применив к такой системе принципы квантовой механики, он показал, что куперовские пары будут преодолевать этот барьер (теперь его принято называть переходом Джозефсона) даже при отсутствии приложенного к ним напряжения. Существование электрического тока подобного рода вскоре было подтверждено экспериментально, а сам эффект также получил название стационарного эффекта Джозефсона.

Пока сила тока не превышает некоторого порога, сверхпроводники, разделенные тончайшим слоем диэлектрика ведут себя, как один монолитный сверхпроводник (рис. 2.6, в).

Если же через переход Джозефсона пропустить ток, превышающий его способность к сверхпроводимости, на барьере произойдет падение напряжения, куперовские пары электронов начнут перемещаться через барьер сначала в одном направлении,

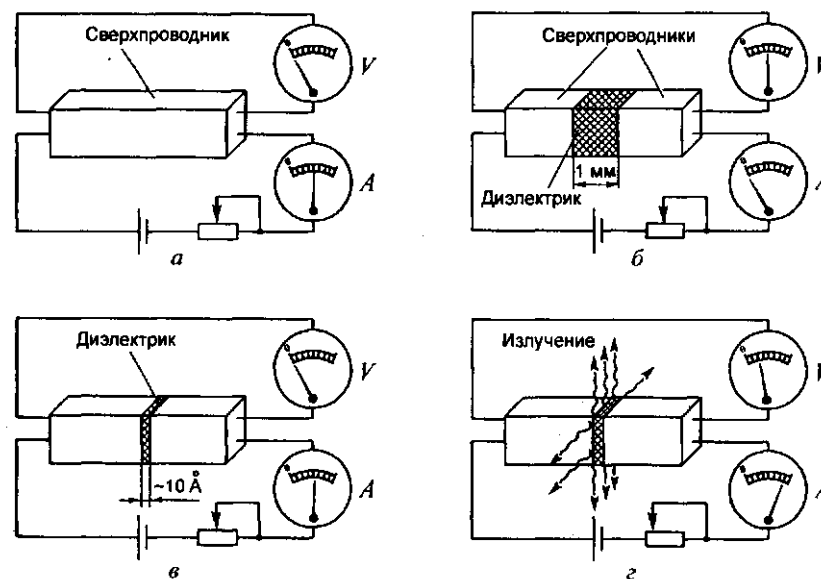


Рис. 2.6. Схемы экспериментов, объясняющих эффект Джозефсона: а — падение напряжения на включенном в электрическую цепь сверхпроводнике равно нулю, ток в цепи ограничен резистором; б — при значительной толщине диэлектрика, разделяющего сверхпроводники, ток в цепи отсутствует; в — стационарный эффект Джозефсона при малом зазоре между сверхпроводниками; з — нестационарный эффект Джозефсона при наличии тока в цепи и напряжения на переходе

нии, а затем в обратном, в результате чего возникнет электромагнитное излучение, частота которого увеличивается пропорционально росту напряжения и может быть измерена с высокой точностью (рис. 2.6, з).

Этот эффект получил название нестационарного эффекта Джозефсона и теперь используется для высокоточной калибровки напряжений.

Во Всероссийском научно-исследовательском институте физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) создана установка на основе матрицы джозефсоновских переходов, изготовленной в Германии, для воспроизведения единицы напряжения постоянного тока. Установка предназначена для калибровки и поверки многоразрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в интегральном исполнении. Такие достаточно дешевые АЦП уже в течение нескольких лет производятся рядом фирм и широко используются в России в измерительных системах и приборах. Установка ВНИИФТРИ необходима также для калибровки и поверки высокоточных мер напряжения и цифровых вольтметров. Технический уровень установки соответствует мировому уровню.

Меры электрического сопротивления. Образцовые и рабочие меры электрического сопротивления выполняются в виде катушек сопротивления. Номинальное сопротивление образцовой катушки должно удовлетворять условию $R = 10^n$ Ом, где n — целое число. Минимальное сопротивление выпускаемых катушек равно 10^{-5} Ом, максимальное — 10^{10} Ом.

Образцовые катушки сопротивления изготавливаются из манганиновой проволоки или ленты. Манганин — это сплав Cu (84 %), Ni (4 %) и Mn (12 %). Он обладает малым температурным коэффициентом сопротивления ($10^{-5} \cdot 1/^\circ\text{C}$), большим удельным сопротивлением ($0,45 \text{ МОм} \cdot \text{м}$) и малой термо-ЭДС при контакте с медью (2 мкВ на 1°C).

Образцовым катушкам сопротивления согласно ГОСТ 23737—79 присваивается один из следующих классов точности: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1 и 0,2. Число, определяющее класс точности катушки, обозначает наибольшую допустимую относительную погрешность, выраженную в процентах.

На рис. 2.7, а показано устройство образцовой катушки. На металлический или фарфоровый каркас 1 наматывается обмотка 2

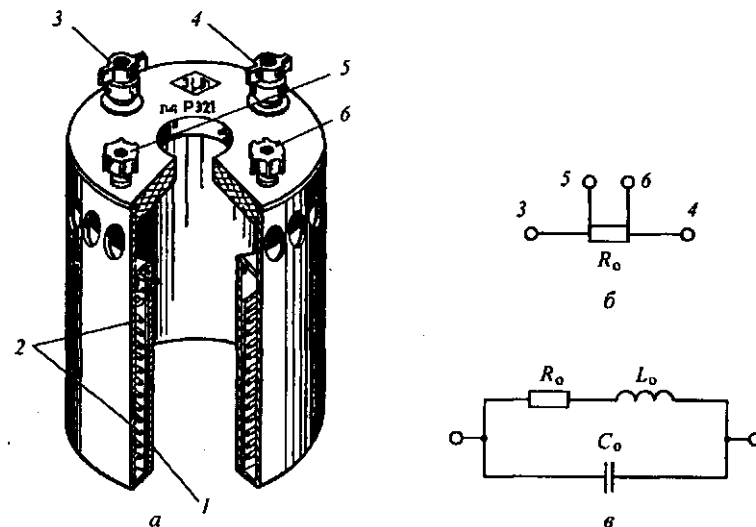


Рис. 2.7. а — образцовая катушка сопротивления, б — схема электрических соединений, в — эквивалентная электрическая схема катушки сопротивления. 1 — фарфоровый каркас; 2 — обмотка; 3 и 4 — токовые зажимы; 5 и 6 — потенциальные зажимы

из манганиновой проволоки, концы которой припаиваются к зажимам 3 и 4. Каркас катушки крепится к корпусу с отверстиями для лучшего охлаждения обмотки. Катушки снабжаются четырьмя зажимами, два из которых называются токовыми (зажимы 3 и 4) и предназначены для включения образцовой катушки в цепь тока, два других называются потенциальными (зажимы 5 и 6). Потенциальные зажимы предназначены для измерения падения напряжения на сопротивление катушки (рис. 2.7, б).

Образцовые катушки должны иметь возможно меньшие собственные емкость и индуктивность. В первом приближении эквивалентную схему катушек сопротивления можно представить в виде схемы на рис. 2.7, в.

Степень безреактивности катушки обычно характеризуется постоянной времени, под которой понимается величина

$$\tau = L_0/R_0 - C_0R_0, \quad (2.1)$$

где L_0 — индуктивность; C_0 — распределенная емкость катушки.

Чем меньше постоянная времени τ , тем лучше катушка. Из (2.1) следует, что у катушек с относительно малым сопротивлени-

ем постоянная времени определяется преимущественно индуктивностью, а у катушек с большим сопротивлением — емкостью.

Для уменьшения постоянной времени катушек применяются специальные виды намотки.

Индуктивность очень мала, когда намотка бифилярная и когда проводник намотан на тонкую изоляционную пластину. При бифилярной намотке проводник складывается вдвое, обе стороны получившейся длинной петли плотно прикладываются друг к другу, и такой сдвоенный провод наматывается на каркас (рис. 2.8). В результате токи, протекающие по двум соседним проводникам, направлены встречно и их суммарное магнитное поле практически равно нулю. Однако бифилярная обмотка, состоящая из значительного числа витков, обладает заметной собственной распределенной емкостью. Для уменьшения емкости бифилярной обмотки ее разделяют на ряд секций. Благодаря последовательному соединению емкостей отдельных секций общая емкость обмотки снижается.



Рис. 2.8. Схема бифилярной намотки

Снижение индуктивности обмотки, выполненной на тонких пластинах, происходит за счет малой площади сечения витков.

Меры индуктивности и взаимной индуктивности. Образцовые и рабочие меры индуктивности и взаимной индуктивности представляют собой катушки индуктивности и взаимной индуктивности. Катушки должны сохранять постоянство индуктивности с течением времени и обладать малым активным сопротивлением, независимостью значения индуктивности от тока и возможно малой зависимостью индуктивности от частоты и температуры.

Образцовые катушки индуктивности (рис. 2.9) представляют собой пластмассовый или фарфоровый каркас с наложенной на него обмоткой из медной изолированной проволоки. Использо-



Рис. 2.9. Образцовая катушка индуктивности P547

ние каркаса из немагнитного материала исключает зависимость индуктивности от тока в катушке. Для уменьшения влияния внешних магнитных полей катушки экранируют. Образцовые катушки индуктивности изготавливают с пятью номинальными значениями: 1; 0,1; 0,01; 0,001 и 0,0001 Г.

Образцовые катушки взаимной индуктивности отличаются от катушек индуктивности наличием двух обмоток, жестко укрепленных на общем каркасе.

Катушки индуктивности и взаимной индуктивности предназначены для работы в цепях переменного тока с частотой до 10 кГц.

Меры емкости. Образцовые и рабочие меры емкости представляют собой конденсаторы постоянной или переменной емкости. К ним предъявляются следующие основные требования: минимальная зависимость емкости от времени, температуры и частоты; малые потери в диэлектрике, высокое сопротивление утечки и прочность изоляции.

Лучше всего этим требованиям отвечают воздушные конденсаторы. Они выпускаются как постоянной, так и переменной емкости. Однако из-за низкой диэлектрической проницаемости воздуха воздушные конденсаторы имеют большие габариты даже при малом значении емкости, поэтому образцовые конденсаторы постоянной емкости с воздушным диэлектриком имеют емкость не более 0,01 мкФ. Максимальная емкость воздушных конденсаторов переменной емкости обычно не превышает 1100 пФ.

В образцовых конденсаторах с большим значением емкости в качестве диэлектрика используется слюда. Слюдяные конденсаторы имеют худшие электрические параметры, чем воздушные, в частности больший тангенс угла диэлектрических потерь, но позволяют получить значительные емкости (до 1 мкФ) при сравнительно небольших габаритах. Они состоят из тонких металлических пластин со слюдяными прослойками.

2.8. Эталоны единиц электрических величин

Эталоном основной единицы электрических величин является эталон силы электрического тока.

Единица силы тока ампер есть сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным про-

водникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызывает между этими проводниками силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.

Установка для воспроизведения ампера представляет собой точные равноплечие весы, к одному из плеч которых подвешена рабочая подвижная катушка K_1 (рис. 2.10). Рабочая катушка помещена внутри неподвижной катушки K_2 , и через обе пропущен один и тот же ток. Сила взаимодействия двух катушек пропорциональна квадрату тока и уравнивается силой тяжести, создаваемой гирями, подвешенными к другому плечу.

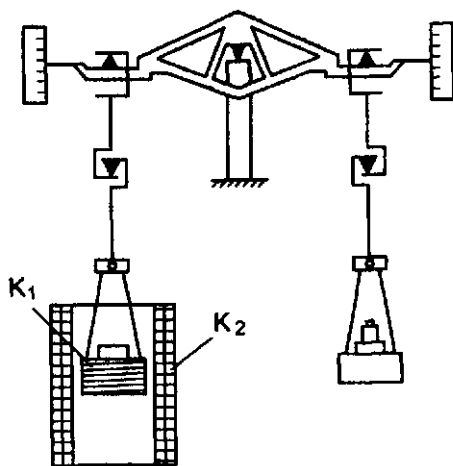


Рис. 2.10. Схема устройства токовых весов

Значение груза, уравнивающего силу взаимодействия между катушками при токе 1 А, находят расчетным путем. Точность установки тока 1 А зависит от точности определения геометрических размеров катушки и силы тяжести, обусловленной гирями. В ампер-весах фактически осуществляется сопоставление тока с единицей длины (размеры катушки), единицей массы (гири) и единицей времени, так как сила тяжести вычисляется по массе гирь и по значению ускорения свободного падения, в формулу которого входит время. Таким образом, ампер воспроизводится через основные единицы — метр, килограмм и секунду.

К эталонам производных единиц относятся эталоны ЭДС, электрического сопротивления, индуктивности и электрической емкости.

Эталон ЭДС состоит из 20 насыщенных нормальных элементов и устройства сравнения (компаратора) для взаимного сличения нормальных элементов. Такую совокупность мер называют групповым эталоном. Электродвижущая сила каждого из элементов с течением времени может несколько колебаться в ту или иную сторону, но среднее значение ЭДС всей группы оказывается стабильным.

Эталон индуктивности является групповым и состоит из четырех катушек. Индуктивность катушек зависит от числа витков и их линейных размеров, т. е. может быть определена путем измерения этих размеров. Это равносильно сравнению эталона индуктивности с метром, являющимся единицей основной величины — длины.

Эталон электрического сопротивления (эталон ома) также является групповым — он состоит из 10 манганиновых катушек электрического сопротивления с номинальным значением 1 Ом, помещенных в двойных герметических кожухах, заполненных сжатым воздухом.

Проверка первичных эталонов ЭДС и сопротивления, т. е. нахождение их числовых значений, осуществляется с помощью первичного эталона индуктивности (эталона генри) и первичного эталона ампера, т. е. с помощью ампер-весов. Для этой цели при помощи специальных методов сравнивают сопротивление R катушки с индуктивным сопротивлением $X = \omega L$ эталона индуктивности на переменном токе, частота которого f точно известна. Круговая частота ω связана с периодом переменного тока T зависимостью $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$.

Электродвижущая сила нормального элемента сравнивается с падением напряжения на измерительной катушке, входящей в состав эталона сопротивления, при прохождении по ней тока, измеряемого ампер-весами.

Эталонные емкости конструируются с многослойными обкладками, помещенными в газообразный диэлектрик. Обкладки изготавливаются из материала с низким температурным коэффициентом расширения, такого, как инвар, они отжигаются и монтируются с соблюдением мер против деформации. Обкладки по-

мещаются в герметичный объем, заполненный сухим воздухом или азотом. Площади обкладок и расстояния между ними точно устанавливаются, так что значение емкости может быть рассчитано. Этот метод позволяет изготавливать емкости до 1000 пФ с относительной точностью $2 \cdot 10^{-8}$ и дрейфом $2 \cdot 10^{-5}$ в год.

Калибратор-измеритель стандартных сигналов КИСС-03 (рис. 2.11) предназначен для проверки, настройки и поверки показывающих регистрирующих приборов и различных измерительных комплексов. Он также может применяться при выполнении пуско-наладочных работ в различных отраслях промышленности. Основные возможности прибора сведены в табл. 2.2.

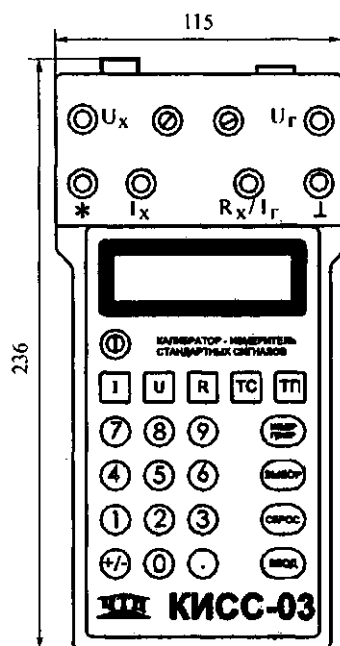


Рис. 2.11

Прибор соответствует обыкновенному исполнению изделий группы 3 по ГОСТ 22261—94.

Входное сопротивление прибора: 1) при измерении постоянного напряжения: не менее 10 МОм; 2) при измерении постоянного тока: не более 30 Ом. Питание прибора осуществляется от аккумуляторной батареи, состоящей из 6 элементов типа АА

Таблица 2.2

Функция прибора	Диапазон	Разрешающая способность	Примечание	Количество индицируемых разрядов
Измерение напряжения	$\pm 0,500000$ В $\pm 2,50000$ В $\pm 12,5000$ В	1 мкВ 10 мкВ 100 мкВ	—	6
Измерение тока	$\pm 22,000$ мА	1 мкА	—	5
Измерение сопротивления	200,00 Ом 2000,0 Ом	0,01 Ом 0,1 Ом	—	5
Генерация напряжения	+0,100000 В +1,00000 В +11,0000 В	1 мкВ 10 мкВ 100 мкВ	При токе нагрузки не более 2,5 мА	6
Генерация тока	22,000 мА	1 мкА	Сопротивление нагрузки от 50 до 500 Ом	5

суммарным номинальным напряжением 7,2 В, или от блока питания (БП), подключаемого к однофазной сети напряжением 220 В, частотой 50 Гц.

Контрольные вопросы

1. Что такое «эталон»?
2. Кто может проводить поверку средств измерений?
3. Как классифицируются меры?
4. Для чего применяется бифилярная намотка?
5. Что является эталоном основной единицы электрических величин?

Глава 3

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ

3.1. Общие вопросы

Аналоговыми измерительными приборами называют приборы, показания которых являются непрерывной функцией изменений измеряемой величины. Аналоговый электроизмерительный прибор — это, в первую очередь, показывающий прибор, т. е. прибор, допускающий считывание показаний. Для этого у всех аналоговых электроизмерительных приборов имеется отсчетное устройство, состоящее из шкалы, расположенной на циферблате прибора, и указателя.

Указатель отсчетного устройства жестко связан с подвижной частью измерительного механизма, осуществляющего обычно преобразование измеряемой электрической величины в угловое перемещение подвижной части, а следовательно, и указателя.

В измерительном механизме поворот подвижной части осуществляется под действием возникающего в механизме вращающего момента. Значение вращающего момента пропорционально измеряемой электрической величине. Для того чтобы обеспечить однозначную связь между углом поворота подвижной части и значением измеряемой величины, необходимо в каждом аналоговом приборе создавать противодействующий момент, пропорциональный углу поворота подвижной части механизма.

Характер движения подвижной части, а следовательно, и указателя к установившемуся положению играет в приборах существенную роль, определяющую быстрдействие прибора. Поэтому во всех аналоговых приборах предусмотрены различ-

ные устройства по созданию оптимального успокаивающего момента.

Наличие подвижной части в измерительном механизме требует применения специальных опорных устройств, создающих относительно малый момент трения.

Таким образом, независимо от назначения аналогового электроизмерительного прибора и от разновидности применяемого в нем измерительного механизма любой прибор содержит общие для всех аналоговых приборов узлы и элементы. Это — отсчетное устройство, устройства по созданию противодействующего и успокаивающего моментов, опорное устройство. Кроме того, общими для всех аналоговых приборов являются и технические требования, определяемые соответствующими ГОСТ. Ниже рассматриваются технические требования к аналоговым приборам, а также конструкции и особенности работы всех перечисленных выше устройств.

3.2. Технические требования

Общие технические требования ко всем аналоговым приборам, а также к мерам электрических величин и измерительным преобразователям сформулированы в ГОСТ 8711—93 (МЭК 51-2—84) «Приборы аналоговые показывающие электроизмерительные прямого действия и вспомогательные части к ним», Государственные стандарты на отдельные виды аппаратуры устанавливают различные классы точности приборов. Для амперметров и вольтметров установлены следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 и 5,0. Классы точности приборов устанавливаются по основной приведенной погрешности. Наибольшее численное значение основной приведенной погрешности прибора каждого данного класса не должно превышать численного значения этого класса. Например, для прибора класса 0,2 численное значение наибольшей основной приведенной погрешности не должно превышать $\pm 0,2\%$.

Кроме того, в ГОСТ для каждого данного класса точности прибора регламентируются погрешности от вариации показаний и изменения показаний прибора от различных внешних факто-

ров (наклон прибора, температура окружающей среды, внешние магнитные и электрические поля и т. д.).

Требования к электрической прочности и сопротивлению изоляции между изолированными от корпуса по постоянному току электрическими цепями приборов устанавливаются соответствующими ГОСТ. Кроме того, регламентируется время успокоения подвижной части приборов.

Время установления показаний, обусловленное временем успокоения подвижной части, у абсолютного большинства аналоговых приборов не должно превышать 4 с. Это значит, что с момента подачи измеряемой величины на вход прибора, или с момента изменения этой величины, установившееся положение указателя отсчетного устройства наступает не более чем через 4 с. Исключение составляют термоэлектрические и электростатические приборы, для которых наибольшее время установления показаний не превышает 6 с.

В соответствии с требованиями ГОСТ аналоговые показывающие приборы должны выдерживать нагрузку током или напряжением, равным 120 % конечного значения, в течение 2 ч. Регламентируются также кратковременные (ударные) перегрузки приборов током и напряжением. Так, для амперметров классов точности 0,5...5,0 предусмотрена возможность перегрузки током, равным $10I_{ном}$, в течение 0,5 с.

Для всех приборов по значениям климатических и механических влияющих величин ГОСТ 22261—94 устанавливает семь различных групп. Регламентируются значения климатических и механических величин для каждой группы приборов как при рабочих условиях применения, так и при транспортировании и хранении приборов (предельные условия). Так, четвертая группа средств измерений имеет следующие климатические рабочие условия применения: нижнее значение температуры окружающего воздуха $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, верхнее $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, наибольшая относительная влажность воздуха 90 % при температуре окружающего воздуха $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ и атмосферное давление 86...106 кПа.

Принцип действия прибора, возможность его работы в тех или иных условиях, возможные предельные погрешности прибора могут быть установлены по условным обозначениям, нанесенным на циферблате прибора. Виды условных обозначений установлены ГОСТ 23217—78.

3.3. Отсчетные устройства

Отсчетное устройство аналогового средства измерения обязательно имеет шкалу, нанесенную на циферблат прибора. Технические требования к циферблатам и шкалам приборов установлены ГОСТ 5365—83.

На шкалу (рис. 3.1) наносятся отметки, обычно в виде короткой вертикальной черты, соответствующие некоторым значениям измеряемой величины. Интервал между двумя соседними отметками шкалы называют делением шкалы. Отметки шкалы, у которых проставлены числа (на шкале на рис. 3.1 это числа 0; 2; 4; 6; 8 и 10), называют числовыми отметками шкалы. Шкалы могут быть равномерными (деления постоянной длины) и неравномерными (деления непостоянной длины). На рис. 3.1 изображена неравномерная шкала. Наименьшее значение измеряемой величины, указанное на шкале, называется начальным значением шкалы x_n . В нашем случае (рис. 3.1) $x_n = 0$.

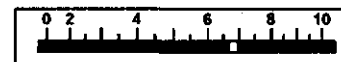


Рис. 3.1. Шкала прибора с оптическим отсчетным устройством

Наибольшее значение измеряемой величины, указанное на шкале, называют конечным значением шкалы x_k . Для шкалы, изображенной на рис. 3.1, $x_k = 10$. По шкале прибора можно определить диапазон показаний прибора и диапазон измерений прибора. Диапазоном показаний называют область значений шкалы, ограниченную конечным и начальным значениями шкалы. В рассматриваемом случае диапазон показаний равен 0...10.

Область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности средства измерений, называют диапазоном измерений. Обычно при равномерной шкале диапазон измерений и диапазон показаний совпадают. Однако при неравномерной шкале диапазон показаний не совпадает с диапазоном измерений. На шкале, изображенной на рис. 3.1, диапазон измерений равен 2...10.

Наименьшее значение диапазона измерений (в нашем случае числовая отметка 2) называют нижним пределом измерений, а наибольшее значение диапазона измерений — верхним пределом

измерений. На рассматриваемой шкале верхний предел измерения совпадает с конечным значением шкалы и равен 10.

Отсчет значения измеряемой величины по шкале прибора производится с помощью указателя. Различают два вида указателей: указатель, представляющий собой стрелку, конец которой выполнен в форме, обеспечивающей отсчет показаний с необходимой точностью, и световой указатель в виде луча света, образующего на шкале световое пятно с индексом, по которому производят отсчет показаний. В приборах со световым указателем на подвижной части измерительного механизма устанавливается небольшое зеркальце. Луч света, создаваемый обычной миниатюрной лампочкой накаливания с помощью простейшей оптики, отражаясь от зеркальца подвижной части, попадает на узкую полоску матового стекла, расположенного на циферблате под шкалой, и образует световое пятно с индексом нитевидного типа (см. рис. 3.1). При повороте подвижной части поворачивается жестко скрепленное с ней зеркальце и, следовательно, перемещается под шкалой отсчетного устройства световое пятно с индексом, указывая значение измеряемой величины.

В приборах с указателем в виде стрелки, жестко скрепленной с подвижной частью измерительного механизма, отсчет значения измеряемой величины производится по положению указывающей части стрелки у шкалы прибора. Форма указывающей части стрелки должна обеспечивать отсчет показаний с необходимой точностью.

В лабораторных приборах повышенных классов точности наибольшее распространение получили так называемые отсчетные устройства с зеркальной шкалой (рис. 3.2).

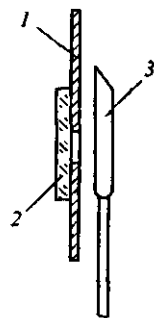


Рис. 3.2. Отсчетное устройство с зеркальной шкалой

На циферблате 1 под шкалой устанавливается на всю длину шкалы узкая полоска зеркала 2. Экспериментатор перед проведением отсчета перемещением головы совмещает отражение стрелки в зеркале с самой стрелкой 3. Только после этого, т. е. после устранения параллакса, производится отсчет по шкале прибора.

3.4. Опорные устройства и устройства для создания противодействующего момента

Крепят подвижную часть измерительного механизма так, чтобы резко снизить или устранить трение при ее повороте (рис. 3.3). При креплении подвижной части на стальной оси 5 их заточенные на конус концы 4 входят в конусообразные углубления камней 3 (агат, корунд и др.), вставленных в гнезда подпятников 2. Подпятники установлены в резьбовых отверстиях жесткого каркаса 1. Положение верхнего подпятника регулируют так, чтобы рамка свободно вращалась и имела незначительный продольный люфт. При таком креплении устранить трение невозможно, однако в приборах невысокой чувствительности при значительных вращающих и противодействующих моментах оно вызывает незначительную дополнительную погрешность. Противодействующий момент в аналоговых измерительных приборах создается в большинстве случаев двумя способами — с помощью противодействующих пружин 6 и растяжек.

Противодействующие пружины выполняются в виде спирали из фосфористой или оловянно-цинковой бронзы. Один конец спиральной пружины, внутренний, прикрепляется к подвижной

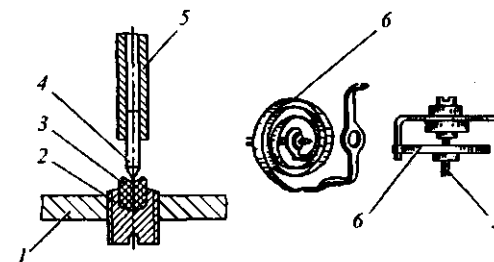


Рис. 3.3

части измерительного механизма, а другой, наружный, — к неподвижной части прибора. Таким образом, вращающий момент, возникающий в измерительном механизме, закручивает противодействующую пружину до тех пор, пока вращающий момент не будет равен противодействующему моменту. Чаще всего для создания противодействующего момента применяют не одну, а две пружины, устанавливая их с разных сторон подвижной части измерительного механизма. В случае применения двух спиральных пружин последние обычно используются также для подведения тока в подвижную часть прибора. В механизмах высокой чувствительности применяют растяжки и подвесы.

Растяжки представляют собой металлические ленточки шириной от 0,08 до 0,35 мм и толщиной от 0,01 до 0,04 мм. В качестве материала при изготовлении растяжек используются различные виды бронзы, платины, а также кобальт-никель-хромовый сплав. Обычно используются две растяжки, укрепляемые с двух сторон подвижной части (рис. 3.4, а). Таким образом, растяжки не только создают противодействующий момент при повороте подвижной части под действием вращающего момента, но и укрепляют (растягивают) подвижную часть. При применении растяжек нет необходимости в специальных опорных устройствах (кернах, подпятниках), которые нужны при использовании противодействующих пружин.

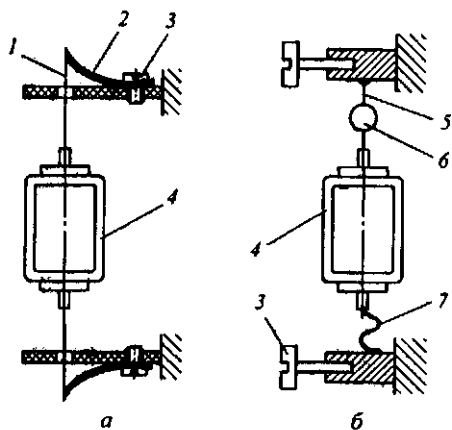


Рис. 3.4. Установка на растяжках и на подвесе: 1 — растяжка; 2 — пружина; 3 — крепящий контактный винт; 4 — рамка; 5 — подвес; 6 — зеркало; 7 — безмоментная лента

Наличие двух растяжек позволяет использовать их и для подведения тока в подвижную часть измерительного механизма.

В реальных приборах одна из растяжек так же, как и внешний конец одной из спиральных противодействующих пружин, прикрепляется не к неподвижной части прибора, а к специальному винту, укрепленному на корпусе прибора и называемому корректором. Поворот корректора на некоторый угол в ту или иную сторону позволяет изменять начальное положение подвижной части прибора и тем самым устанавливать указатель выключенного прибора на нулевую отметку. Применение растяжек, изготавливаемых на основе современной технологии, позволяет исключить трение в опорах и повысить чувствительность измерительных механизмов. В особо чувствительных гальванометрах подвижную часть устанавливают на подвесе (рис. 3.4, б).

3.5. Устройства для создания успокаивающего момента

Подвижная часть, а следовательно, и указатель отсчетного устройства занимают вполне определенное положение, соответствующее значению измеряемой величины только тогда, когда вращающий момент равен моменту противодействующему. При любом изменении измеряемой величины изменяется вращающий момент и, следовательно, нарушается равенство между значениями вращающего и противодействующего моментов. Подвижная часть измерительного механизма под действием разности названных моментов начнет перемещаться в ту или иную сторону до тех пор, пока вновь не наступит равенство между значениями вращающего и противодействующего моментов. Время, необходимое для этого, называют временем успокоения подвижной части прибора.

Для обеспечения требуемого времени успокоения подвижной части в аналоговых приборах применяют различные устройства, создающие успокаивающий момент. К ним относятся воздушный, магнитоиндукционный или жидкостный успокоители.

Воздушный успокоитель (рис. 3.5, а) применяется, главным образом, в приборах старых разработок, имеющих подвижную часть на оси с противодействующими пружинами. Он представляет собой закрытую камеру 1, внутри которой перемещается

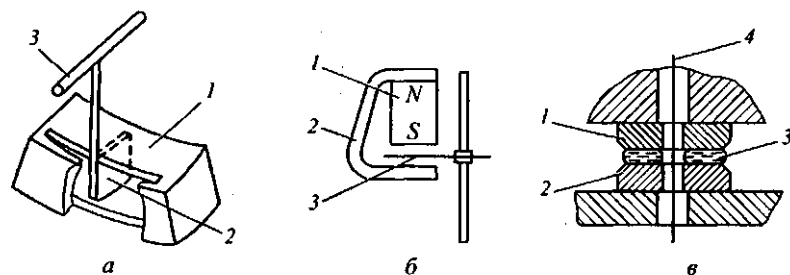


Рис. 3.5. Успокоители: а — воздушный; б — магнитоиндукционный; в — жидкостный

при движении подвижной части легкое алюминиевое крыло 2, жестко укрепленное на оси 3 подвижной части измерительного механизма. Между алюминиевым крылом 2 и корпусом 1 имеется небольшой зазор. При движении крыла воздух перемещается из одной части камеры в другую, создавая успокаивающий момент, способствующий оптимальному успокоению подвижной части прибора.

Магнитоиндукционный успокоитель (рис. 3.5, б) состоит из неподвижного постоянного магнита 1 с магнитопроводом 2 и крыла успокоителя 3, жестко скрепленного с подвижной частью прибора. Крыло успокоителя выполнено из немагнитного материала, обычно алюминия.

При движении подвижной части, а следовательно, и крыла успокоителя в последнем при пересечении поля постоянного магнита наводятся вихревые токи. Взаимодействие этих токов с полем постоянного магнита создает успокаивающий момент.

Магнитоиндукционный успокоитель по конструкции проще воздушного успокоителя и более удобен при регулировке успокаивающего момента. Однако применение магнитоиндукционного успокоителя возможно лишь в приборах, где поле постоянного магнита не будет оказывать существенного влияния на работу измерительного механизма.

Жидкостный успокоитель применяется, главным образом, в приборах, имеющих малые размеры по высоте, однако в последнее время его стали применять и в приборах обычного габарита. Жидкостный успокоитель (рис. 3.5, в) состоит из двух дисков. Диск 1 укрепляется на подвижной части прибора, а диск 2 — на неподвижной части. Зазор между дисками обычно составляет 0,1...0,15 мм. Между дисками заливается специальная маловысы-

хающая кремнийорганическая жидкость 3. Жидкость в зазоре удерживается поверхностным натяжением. Для предотвращения вытекания жидкости из зазора поверхности дисков, соприкасающиеся с жидкостью, тщательно полируются.

Благодаря определенной вязкости применяемой жидкости при движении подвижной части, т. е. при вращательном движении диска 1 относительно диска 2, из-за трения между слоями жидкости возникает успокаивающий момент.

Жидкостный успокоитель применяется, главным образом, в приборах, в которых подвижная часть укреплена на растяжках. Растяжка 4 проходит через небольшие отверстия, сделанные в дисках.

Контрольные вопросы

1. Для чего применяется зеркальная шкала?
2. Как создается противодействующий момент?
3. Как может подводиться ток к подвижной части измерительного механизма?
4. Какая жидкость используется в жидкостных успокоителях?

Глава 4

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

4.1. Шунты и добавочные резисторы

Магнитоэлектрический механизм, включенный непосредственно в измерительную цепь, позволяет измерять малые постоянные токи, не превышающие 20—50 мА. Превышение указанных значений может привести к повреждениям провода рамки и спиральной пружины. Таким образом, сам магнитоэлектрический механизм может выступать только в роли микроамперметра или миллиамперметра. Для того чтобы измерять большие токи, используют измерительные цепи, включающие в себя *шунты*. Шунт является простейшим измерительным преобразователем тока в напряжение. Он представляет собой четырехзажимный резистор. Два входных зажима, к которым подводится ток I , называются токовыми, а два выходных зажима, с которых снимается напряжение U , называются потенциальными. К потенциальным зажимам обычно присоединяют измерительный механизм *ИМ* прибора.

Шунт характеризуется номинальным значением входного тока $I_{\text{ном}}$ и номинальным значением выходного напряжения $U_{\text{ном}}$. Их отношение определяет номинальное сопротивление шунта $R_{\text{ш}} = U_{\text{ном}}/I_{\text{ном}}$. Шунты применяются для расширения пределов измерения измерительных механизмов по току, при этом большую часть измеряемого тока пропускают через шунт, а меньшую — через измерительный механизм. Шунты имеют небольшое сопротивление и применяются, главным образом, в цепях постоянного тока с магнитоэлектрическими измерительными механизмами.

На рис. 4.1 приведена схема включения магнитоэлектрического механизма *ИМ* с шунтом $R_{\text{ш}}$. Ток $I_{\text{и}}$, протекающий через измерительный механизм, связан с измеряемым током I зависимостью

$$I_{\text{и}} = I \frac{R_{\text{ш}}}{R_{\text{ш}} + R_{\text{и}}},$$

где $R_{\text{и}}$ — сопротивление измерительного механизма.

Если необходимо, чтобы ток $I_{\text{и}}$ был в n раз меньше тока I , то сопротивление шунта должно быть:

$$R_{\text{ш}} = R_{\text{и}}/(n - 1),$$

где $n = I/I_{\text{и}}$ — коэффициент шунтирования.

Шунты изготовляют из манганина, сплава с высоким удельным сопротивлением и малой зависимостью его от температуры. Если шунт рассчитан на небольшой ток, то его обычно встраивают в корпус прибора (внутренние шунты). Для измерения больших токов используют приборы с наружными шунтами. В этом случае мощность, рассеиваемая в шунте, не нагревает прибор.

На рис. 4.2 показан наружный шунт на 20 А. Он имеет массивные наконечники из меди 4, которые служат для отвода тепла от манганиновых пластин 3, впаянных между ними. Зажимы шунта 1 — токовые, 2 — потенциальные.

Измерительный механизм присоединяют к потенциальным зажимам 2, между которыми и заключено сопротивление шунта. При таком включении измерительного механизма устраняются погрешности от контактных сопротивлений.

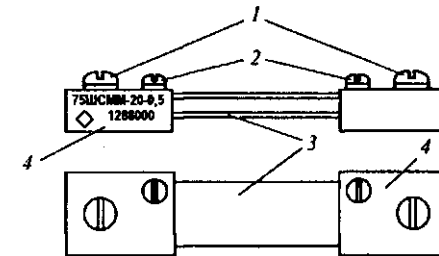


Рис. 4.1. Схема соединения измерительного механизма с шунтом

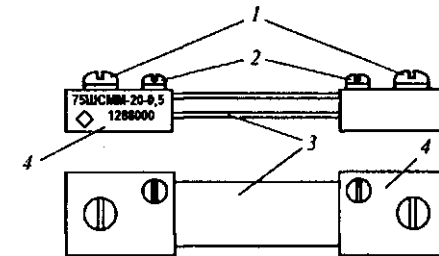


Рис. 4.2. Наружный шунт: 1 — токовые зажимы; 2 — потенциальные зажимы; 3 — манганиновые пластины; 4 — медные наконечники

Наружные шунты обычно выполняются калиброванными, т. е. рассчитываются на определенные токи и падения напряжения. По ГОСТ 8042—93 калиброванные шунты должны иметь номинальное падение напряжения 10, 15, 30, 50, 60, 75, 100, 150 и 300 мВ.

Для переносных магнитоэлектрических приборов на токи до 30 А внутренние шунты изготовляют на несколько пределов измерения. На рис. 4.3, а, б показаны схемы многопредельных шунтов. Многопредельный шунт состоит из нескольких резисторов, которые можно переключать в зависимости от предела измерения путем переноса провода с одного зажима на другой (рис. 4.3, а) или переключателем (рис. 4.3, б).

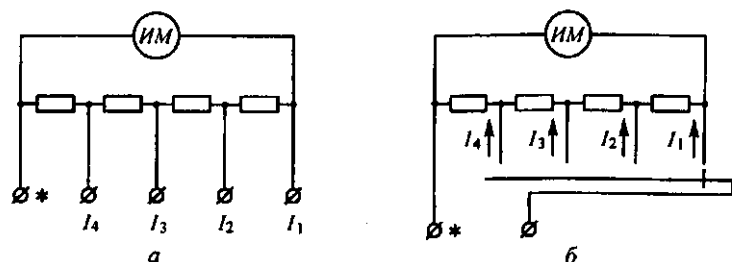


Рис. 4.3. Схемы многопредельных шунтов: а — шунта с отдельными выводами; б — шунта, с переключателем

Применение шунтов с измерительными механизмами других систем, кроме магнитоэлектрической, нерационально, так как другие измерительные механизмы потребляют большую мощность, что приводит к существенному увеличению сопротивления шунтов и, следовательно, к увеличению их размеров и потребляемой мощности.

Шунты разделяются на классы точности 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5. Число, определяющее класс точности, обозначает допустимое отклонение сопротивления шунта в процентах его номинального значения.

Серийные шунты выпускаются для токов не более 5000 А. Для измерения токов свыше 5000 А допустимо параллельное соединение шунтов.

Добавочные резисторы являются измерительными преобразователями напряжения в ток, а на значение тока непосредственно реагируют измерительные механизмы стрелочных вольтметров

всех систем, за исключением электростатической и электронной. Добавочные резисторы служат для расширения пределов измерения по напряжению вольтметров различных систем и других приборов, имеющих параллельные цепи, подключаемые к источнику напряжения. Сюда относятся, например, ваттметры, счетчики энергии, фазометры и т. д.

Добавочный резистор включают последовательно с измерительным механизмом (рис. 4.4). Ток I_n в цепи, состоящий из измерительного механизма с сопротивлением R_n и добавочного резистора с сопротивлением R_d составит:

$$I_n = U / (R_n + R_d),$$

где U — измеряемое напряжение.

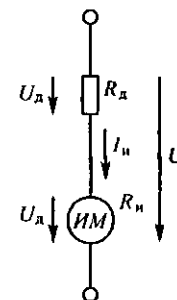


Рис. 4.4. Схема соединения измерительного механизма с добавочным резистором

Если вольтметр имеет предел измерения $U_{ном}$ и сопротивление измерительного механизма R_n и при помощи добавочного резистора R_d надо расширить предел измерения в n раз, то, учитывая постоянство тока I_n , протекающего через измерительный механизм вольтметра, можно записать:

$$U_{ном} / R_n = n U_{ном} / (R_n + R_d),$$

откуда

$$R_d = R_n(n - 1).$$

Добавочные резисторы изготовляются обычно из изолированной манганиновой проволоки, намотанной на пластины или каркасы из изоляционного материала.

Они применяются в цепях постоянного и переменного тока. Добавочные резисторы, предназначенные для работы на переменном токе, имеют бифилярную обмотку для уменьшения собственной индуктивности.

При применении добавочных резисторов не только расширяются пределы измерения вольтметров, но и уменьшается их температурная погрешность. Если принять, что обмотка измерительного механизма имеет температурный коэффициент сопротивления β_n , а добавочный резистор — температурный коэффициент сопротивления, то температурный коэффициент всего вольтметра (см. рис. 4.4) равен:

$$\beta = (\beta_n R_n + \beta_d R_d) / (R_n + R_d).$$

Обычно $\beta_d = 0$, тогда

$$\beta = \beta_n \frac{R_n}{R_n + R_d}.$$

В переносных приборах добавочные резисторы изготавливаются секционными на несколько пределов измерения (рис. 4.5).

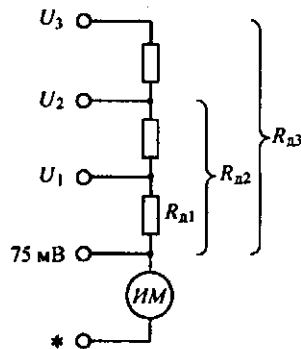


Рис. 4.5. Схема многопределного вольтметра

Добавочные резисторы бывают внутренние и наружные. Последние выполняются в виде отдельных блоков и подразделяются на индивидуальные и калиброванные. Индивидуальный резистор применяется только с тем прибором, который с ним градуировался. Калиброванный резистор может применяться с любым прибором, номинальный ток которого равен номинальному току добавочного резистора.

Калиброванные добавочные резисторы делятся на классы точности 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 и 1,0. Они выполняются на номинальные токи от 0,5 до 30 мА.

Добавочные резисторы применяются для преобразования напряжений до 30 кВ.

4.2. Измерительные трансформаторы. Гальваническая развязка

Измерительные трансформаторы подразделяются на трансформаторы тока и напряжения и предназначаются соответственно для преобразования больших переменных токов и напряжений в относительно малые токи и напряжения. Благодаря трансформаторам можно применять приборы с небольшими стандартными номинальными значениями тока и напряжения (например, 5 А и 100 В) в высоковольтных цепях, по которым могут протекать большие токи.

Измерительные трансформаторы состоят из двух изолированных друг от друга обмоток, помещенных на магнитопроводе: первичной с числом витков w_1 и вторичной с числом витков w_2 (рис. 4.6).

При измерениях в высоковольтных цепях трансформаторы обеспечивают безопасность обслуживания приборов, присоединенных к вторичным обмоткам. Это достигается за счет электрической изоляции (*гальванической развязки*) первичной и вторичной обмоток трансформаторов и заземления металлического корпуса и вторичной обмотки. Передача сигнала происходит только по магнитному полю. При отсутствии заземления и повреждении изоляции между обмотками вторичная обмотка и подключенные к ней приборы окажутся под высоким потенциалом, а через тело оператора может протекать опасный ток, что недопустимо.

В трансформаторах тока, как правило, первичный ток I_1 больше вторичного I_2 . Первичная обмотка выполняется

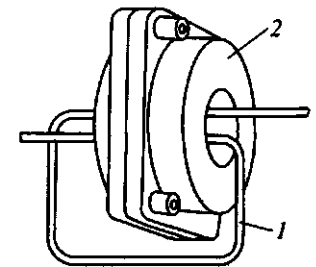


Рис. 4.6. Измерительный трансформатор: 1 — первичная обмотка ($w_1 = 1$); 2 — магнитопровод с вторичной обмоткой

из провода различного сечения в зависимости от номинального первичного тока $I_{1ном}$. Если $I_{1ном}$ превышает 500 А, она может состоять из одного витка в виде прямой медной шины (или стержня), проходящей через окно сердечника. Вторичная обмотка у всех стандартных трансформаторов тока наматывается из проводов небольшого сечения. В соответствии с ГОСТ 7746—2001 вторичный номинальный ток $I_{2ном}$ может быть 1; 2; 2,5; 5 А при значениях $I_{1ном}$ в пределах от 0,8 до 40 000 А. В трансформаторах напряжения первичное напряжение U_1 больше вторичного U_2 , поэтому у них $w_1 > w_2$. Обе обмотки выполняются из относительно тонкого провода (первичная — из более тонкого, чем вторичная). Вторичное номинальное напряжение $U_{2ном}$ у стационарных трансформаторов составляет 100 и $100/\sqrt{3}$ В при первичном номинальном напряжении $U_{1ном}$ до $750/\sqrt{3}$ В.

По схемам включения в измеряемую цепь и условию работы трансформаторы тока и напряжения отличаются друг от друга. Первичная обмотка трансформаторов тока, выводы которой обозначаются буквами L_1, L_2 (линия), включается в измеряемую цепь последовательно (рис. 4.7).

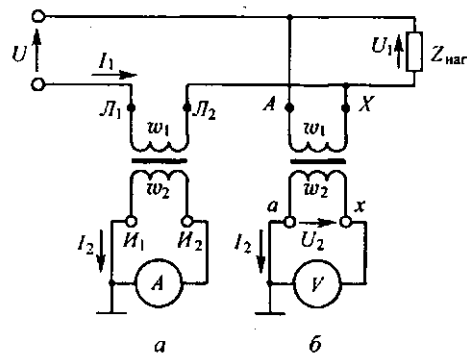


Рис. 4.7. Схемы включения измерительных трансформаторов: а — трансформатора тока; б — трансформатора напряжения

Ко вторичной обмотке, выводы которой обозначаются буквами $И_1, И_2$ (измерение), последовательно подключают амперметры, последовательные обмотки ваттметров, счетчиков и других приборов. Первичная обмотка трансформатора напряжения, выводы которой обозначаются буквами $А, Х$ (начало — конец), включается в измеряемую цепь параллельно, а к выводам вто-

ричной обмотки, обозначаемой соответственно буквами $а, х$, подключают параллельно вольтметры, параллельные цепи ваттметров, счетчиков и других приборов.

По показаниям приборов, включенных во вторичные обмотки, можно определить значения измеряемых величин. Для этого их показания надо умножить на действительные коэффициенты трансформации K_I и K_U . Для трансформатора тока $K_I = I_1/I_2$. Для трансформатора напряжения $K_U = U_1/U_2$.

Действительные коэффициенты трансформации обычно неизвестны, так как они зависят от режима работы трансформатора, т. е. от значений токов и напряжений, характера и значения сопротивления нагрузки вторичной цепи и частоты тока; поэтому показания прибора умножают не на действительные, а на номинальные коэффициенты трансформации. Они указаны на щитке трансформатора в виде дроби, числитель которой есть номинальное значение первичной, а знаменатель — вторичной величины. Номинальный коэффициент трансформации для данного трансформатора имеет постоянное значение. Для трансформаторов тока обозначим его $K_{Iном}$, для трансформаторов напряжения — $K_{Uном}$.

Относительная погрешность в процентах из-за неравенства действительного и номинального коэффициентов трансформации определяется выражениями:

для трансформатора тока

$$\gamma_I = \frac{I'_1 - I_1}{I_1} 100\% = \frac{K_{Iном} - K_I}{K_I} 100\%,$$

где

$$I'_1 = K_{Iном} I_2, \quad I_1 = K_I I_2;$$

для трансформатора напряжения

$$\gamma_U = \frac{U'_1 - U_1}{U_1} 100\% = \frac{K_{Uном} - K_U}{K_U} 100\%,$$

где

$$U'_1 = K_{Uном} U_2, \quad U_1 = K_U U_2.$$

Погрешность γ_I называется токовой погрешностью, а γ_U — погрешностью напряжения. Кроме этих погрешностей у измери-

тельных трансформаторов имеется еще так называемая угловая погрешность. Она возникает из-за фазовых сдвигов между первичной и вторичной величиной, вносимых трансформатором.

В идеальном трансформаторе вектор вторичного тока I_2 сдвинут по фазе относительно вектора первичного тока I_1 , на 180° . Такой же сдвиг по фазе должен быть между векторами вторичного U_2 и первичного U_1 , напряжений в трансформаторе напряжения. В реальном трансформаторе угол между повернутым на 180° вектором вторичной величины и соответствующим вектором первичной величины не равен нулю, а составляет угол δ , который называется угловой погрешностью трансформатора. Погрешность считается положительной, если повернутый на 180° вектор вторичной величины опережает вектор первичной величины.

Угловая погрешность измерительных трансформаторов влияет только на показания приборов, отклонение подвижной части которых зависит от сдвига фаз между токами в цепях этих приборов. К ним относятся ваттметры, счетчики энергии и фазометры.

4.3. Измерительные трансформаторы тока

На рис. 4.8 изображено схематическое устройство трансформатора тока (ТТ). Первичная обмотка 3 представляет собой проводник, пропущенный через отверстие проходного изолятора 2. Поверх изолятора намотана многовитковая вторичная обмотка 1, к которой подключается измерительный прибор.

Трансформаторы тока (рис. 4.9) имеют две разновидности: без собственной первичной обмотки; с собственной первичной обмоткой. Одновитковые ТТ, не имеющие собственной первичной обмотки, выполняются встроенными, шинными или разъёмными.

Встроенный трансформатор тока (рис. 4.9, а) представляет собой магнитопровод с намотанной на него вторичной обмоткой. Он не имеет собственной первичной обмотки. Ее роль выполняет токоведущий стержень проходного изолятора. Этот трансформатор тока не имеет изоляционных элементов между первичной и вторичной обмотками. Их роль выполняет изоляция проходного изолятора.

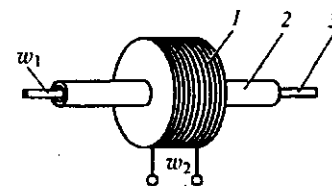


Рис. 4.8. Схематическое устройство трансформатора тока

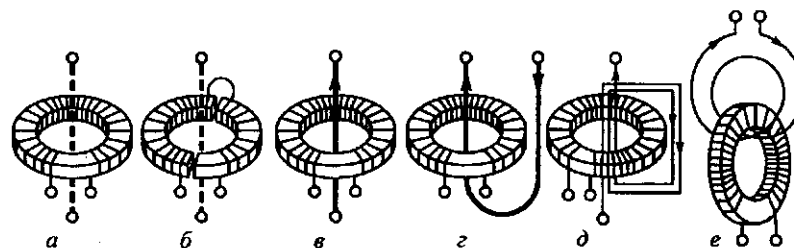


Рис. 4.9. Трансформаторы тока

В шинном трансформаторе тока роль первичной обмотки выполняют одна или несколько шин распределительного устройства, пропускаемые при монтаже сквозь полость проходного изолятора. Последний изолирует такую первичную обмотку от вторичной.

Разъёмный трансформатор тока (рис. 4.9, б) тоже не имеет собственной первичной обмотки. Его магнитопровод состоит из двух частей, стягиваемых болтами. Он может размыкаться и смыкаться вокруг проводника с током, являющимся первичной обмоткой этого ТТ. Изоляция между первичной и вторичной обмотками наложена на магнитопровод со вторичной обмоткой.

Одновитковые ТТ, имеющие собственную первичную обмотку, выполняются со стержневой первичной обмоткой или с U-образной.

Трансформатор тока (рис. 4.9, в) имеет первичную обмотку в виде стержня круглого или прямоугольного сечения, закрепленного в проходном изоляторе.

Трансформатор тока (рис. 4.9, г) имеет U-образную первичную обмотку, выполненную таким образом, что на нее наложена почти вся внутренняя изоляция ТТ.

Многовитковые трансформаторы тока изготавливаются с катушечной первичной обмоткой, надеваемой на магнитопровод: с

петлевой первичной обмоткой (рис. 4.9, д), состоящей из нескольких витков; со звеньевой первичной обмоткой (рис. 4.9, е), выполненной таким образом, что внутренняя изоляция трансформатора тока конструктивно распределена между первичной и вторичной обмотками, а взаимное расположение обмоток напоминает звенья цепи.



Рис. 4.10. Токовые клещи

трансформаторов невелика, но достаточна для ориентировочных измерений.

4.4. Измерительные трансформаторы напряжения

В соответствии с ГОСТ 1983—2001 трансформаторам присваиваются классы точности, выбираемые из ряда: 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 3,0.

По внешнему виду и устройству трансформаторы напряжения мало отличаются от силовых трансформаторов на небольшие мощности. Лабораторные трансформаторы чаще всего бывают переносными на несколько пределов измерения. Для трехфазных цепей изготавливаются трехфазные трансформаторы напряжения (рис. 4.11). На трех стержнях магнитопровода располагаются три первичные и три вторичные обмотки. Первичные обмотки присоединяются к трехфазной цепи, к выводам вторичных обмоток присоединяются измерительные приборы.

По роду изоляции между первичной и вторичной обмотками ТТ изготавливаются с твердой (фарфор, литая изоляция, прессованная изоляция и т. д.); с вязкой (заливочные компаунды); с комбинированной (бумажно-масляная, конденсаторного типа) или газообразной (воздух, элегаз) изоляцией.

Самые простые модели *токовых клещей* (рис. 4.10) представляют собой трансформатор тока с разъемным магнитопроводом, благодаря чему он может охватывать провод, образующий первичную обмотку. Они предназначены для бесконтактного измерения тока в цепях напряжением до 1000 В. Точность таких

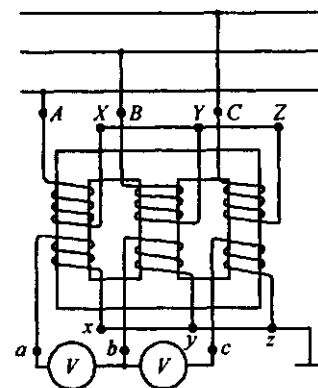


Рис. 4.11. Трехфазный трансформатор напряжения

По виду охлаждения трансформаторы напряжения делятся на сухие (для напряжений до 3 кВ) и трансформаторы с заливкой маслом или изолирующей массой (для напряжений 3 кВ и выше).

4.5. Датчики Холла

Эффект Холла вызывается силой Лоренца, которая действует на носители электрических зарядов, движущиеся в магнитном поле, перпендикулярном направлению движения заряда. Датчик Холла представляет из себя пластинку проводника или полупроводника (рис. 4.12, а), к одной паре граней которой присоединен источник тока I_n , с другой граней снимается выходной сигнал. При отсутствии внешнего магнитного поля B носители заряда

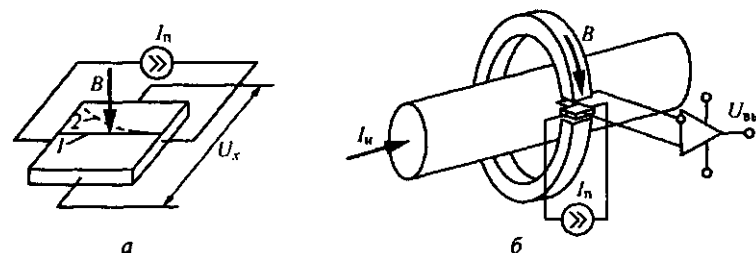


Рис. 4.12. Эффект Холла: а — схема возникновения эффекта; б — устройство датчика

движутся по траектории 1. Концентрация носителей зарядов у противоположных измерительных граней равна. При появлении перпендикулярного магнитного поля B за счет силы Лоренца траектория движения меняется (траектория 2). Из-за этого концентрация носителей зарядов около одной измерительной грани увеличивается, а у другой уменьшается, и между измерительными гранями появляется напряжение U_x .

Датчики работают следующим образом. Через кольцевой сердечник из магнитомягкого материала проходит проводник, по которому течет измеряемый ток $I_{из}$. Вокруг проводника с током образуется магнитное поле, пропорциональное току. В кольце выполняют пропил, в который вставляют датчик Холла. Выходное напряжение датчика Холла, пропорциональное измеряемому току, усиливается и подается на измерительное устройство. Рис. 4.12, б поясняет принцип работы датчика. Если кольцо с датчиком надежно изолировано от токонесущего проводника, обеспечивается гальваническая развязка между проводником, который может иметь высокий электрический потенциал и оператором. Безопасность работы зависит от электрической прочности изолятора.

Контрольные вопросы

1. Для чего применяются шунты?
2. От чего спасает гальваническая развязка?
3. Почему использование датчика Холла безопаснее работы с шунтом?

Глава 5 ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРИБОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

5.1. Общие сведения

Измерительный механизм является преобразователем подведенной к нему электрической энергии в механическую энергию, необходимую для перемещения его подвижной части относительно неподвижной.

У большинства механизмов подвижная часть имеет одну степень свободы, т. е. может поворачиваться вокруг неподвижной оси на угол α или, значительно реже, совершать линейное перемещение.

Входные величины создают механические силы, действующие на подвижную часть. Обычно в механизмах подвижная часть может только поворачиваться вокруг оси, поэтому механические силы, действующие на механизм, создают вращающий момент M .

Вращающий момент, поворачивающий подвижную часть в сторону возрастающих показаний по часовой стрелке, будем считать положительным. Вращающий момент является некоторой функцией измеряемой величины x и угла поворота подвижной части α :

$$M = F_1(x, \alpha). \quad (5.1)$$

Для электромеханических приборов общее выражение вращающего момента можно представить как производную энергии магнитного (или электрического) поля по геометрической коор-

динате, которой для большинства приборов является угол поворота подвижной части, т. е.

$$M = dW_m / d\alpha, \quad (5.2)$$

где W_m — энергия магнитного (или электрического) поля, сосредоточенная в измерительном механизме.

Под действием вращающего момента M подвижная часть поворачивается до тех пор, пока он не уравновесится противодействующим моментом $M_{пр}$. Противодействующий момент $M_{пр}$ направлен навстречу вращающему моменту M и возрастает при увеличении угла поворота подвижной части.

Положение равновесия подвижной части, соответствующее некоторому установившемуся отклонению, будет определяться равенством

$$M + M_{пр} = 0. \quad (5.3)$$

В зависимости от физических явлений, положенных в основу создания вращающего момента, или, другими словами, от способа преобразования электромагнитной энергии, подводимой к прибору, в механическую энергию перемещения подвижной части электромеханические приборы делятся на следующие основные системы: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические, электростатические, индукционные.

Кроме перечисленных основных систем электромеханических приборов известны также вибрационные, тепловые и другие системы приборов.

В данной главе рассматриваются магнитоэлектрические, электродинамические, электростатические механизмы и их применение. Индукционные механизмы рассмотрены в гл. 12.

5.2. Магнитоэлектрические механизмы

Работа механизмов магнитоэлектрической системы основана на взаимодействии магнитного потока постоянного магнита и тока, проходящего по катушке (рамке). Возникающий при этом вращающий момент отклоняет подвижную часть механизма относительно неподвижной. В зависимости от того, какой из ука-

занных элементов (постоянный магнит или рамка) является подвижной частью, различают механизмы с подвижной рамкой и с подвижным магнитом.

Магнитная цепь измерительного механизма с внешним магнитом (рис. 5.1, а) состоит из сильного постоянного магнита 1, полюсных наконечников с цилиндрической расточкой 5 и цилиндрического сердечника 7. В воздушном зазоре между сердечником и полюсными наконечниками создается сильное, практически равномерное радиальное магнитное поле.

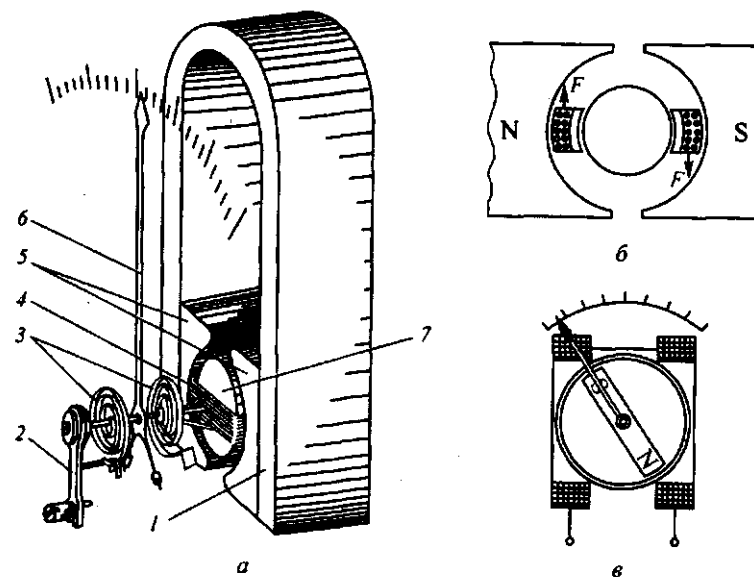


Рис. 5.1. Магнитоэлектрический механизм

Подвижная часть механизма представляет собой катушку (рамку) 4 прямоугольной формы из тонкого медного или алюминиевого провода, намотанного на алюминиевый каркас (либо без каркаса), которая может поворачиваться вокруг сердечника в магнитном поле. К рамке с двух сторон приклеиваются алюминиевые буксы для закрепления растяжек или кернов. Стрелка 6 и циферблат со шкалой образуют отсчетное устройство.

Измеряемый ток I подводится к обмотке рамки через две спиральные пружины 3, которые создают противодействующий момент $M_{пр}$. Одна из спиральных пружин прикреплена к коррек-

тирующему устройству 2. Противодействующий момент пропорционален углу закручивания пружин, или, что то же, углу поворота подвижной части α , т. е. $M_{пр} = -W\alpha$, где W — удельный противодействующий момент, постоянный для данного устройства.

При протекании по обмотке рамки постоянного тока I на рамку действует пара сил $F-F$ (рис 5.1, б), создающая вращающий момент M :

$$M = dW_m/d\alpha = Id\Psi/d\alpha, \quad (5.4)$$

где W_m — энергия магнитного поля; dW_m — приращение энергии магнитного поля; $d\alpha$ — угол поворота.

При повороте рамки на угол $d\alpha$ в равномерном радиальном магнитном поле изменение потокосцепления равно:

$$d\Psi = Blbw d\alpha = Bsw d\alpha,$$

где B — магнитная индукция в воздушном зазоре; l — длина активной стороны витка; b — средняя ширина обмотки рамки; w — число витков рамки; $s = bl$ — активная площадь рамки.

Подставив $d\Psi$ в (5.4), получим:

$$M = BswI = \Psi_0 I,$$

где $\Psi_0 = Bsw$ — изменение потокосцепления обмотки рамки при повороте ее на угол α , равный 1 рад.

Установившееся отклонение подвижной части определяется равенством $M = -M_{пр}$ или $\Psi_0 I = W\alpha$, откуда вытекает уравнение преобразования

$$\alpha = \frac{\Psi_0}{W} I = \frac{Bsw}{W} I = S'_1 I, \quad (5.5)$$

где $S'_1 = \alpha/I$ — чувствительность механизма к току.

Из (5.5) следует, что отклонение подвижной части пропорционально току, т. е. прибор имеет равномерную шкалу.

Успокоение в магнитоэлектрических механизмах магнитоиндукционное, но без применения специальных успокоителей. Момент магнитоиндукционного успокоения подвижной части с каркасной рамкой определяется взаимодействием магнитного потока с вихревыми токами, возникающими в алюминиевом каркасе при движении подвижной части в поле постоянного магнита.

Существуют магнитоэлектрические механизмы, у которых подвижной частью является постоянный магнит, вращающийся внутри неподвижной катушки (рис. 5.1, в). Однако приборы с такими механизмами применяются редко.

В зависимости от класса точности и конструкции прибора применяются различные конструкции магнитной цепи. От магнитной цепи требуется обеспечение постоянства индукции во времени, при изменении температуры, при наличии внешнего магнитного поля и т. п. Постоянные магниты изготавливаются из сплавов железа с никелем, алюминием и кобальтом, обеспечивающих индукцию 0,15—0,3 Тл.

Магнитоэлектрические механизмы, применяемые в амперметрах и вольтметрах, обладают сравнительно большим моментом инерции подвижной части и могут применяться только для измерений на постоянном токе. При пропускании по обмотке рамки тока $i = I_m \sin \omega t$, среднее значение которого за период равно нулю, поворота подвижной части не произойдет, так как среднее за период значение вращающего момента также равно нулю. Действительно, мгновенное значение вращающего момента $m = \Psi_0 i = \Psi_0 \sin \omega t$, а его среднее значение равно:

$$M_{ср} = \frac{\Psi_0 I_m}{T} \int_0^T \sin \omega t dt = 0.$$

Если помимо переменного тока в сигнале имеется постоянная составляющая, то подвижная часть повернется на угол, обусловленный этой составляющей.

Температурные влияния на механизм могут быть результатом выделения тепла в обмотке рамки и изменения температуры внешней среды. При повышении температуры уменьшаются удельный противодействующий момент спиральных пружин и растяжек (примерно на 0,3...0,4 % на 10 °С) и магнитный поток постоянного магнита (примерно на 0,2...0,3 % на 10 °С). Эти факторы в некоторой степени компенсируют друг друга. С повышением температуры возрастает сопротивление обмотки рамки, что из-за большого температурного коэффициента меди или алюминия (4 % на 10 °С) может вызвать значительные изменения показаний.

Достоинствами магнитоэлектрического механизма по сравнению с другими механизмами являются большая чувствитель-

ность, малое собственное потребление мощности, малое влияние внешних магнитных полей благодаря сильному собственному магнитному полю, прямая пропорциональность между током в обмотке рамки и углом отклонения.

Недостатки магнитоэлектрических механизмов — сложность конструкции, высокая стоимость, а также чувствительность к перегрузкам.

Благодаря отмеченным достоинствам магнитоэлектрические приборы являются наиболее точными, класс точности достигает 0,1. Температурные погрешности приборов компенсируются с помощью специальных схем.

Магнитоэлектрические приборы находят широкое применение в качестве амперметров и вольтметров постоянного тока с пределами измерений от наноампер до килоампер и от долей милливольт до киловольт, в сочетании с различного рода преобразователями переменного тока в постоянный они используются для измерений в цепях переменного тока.

Широкое применение находят также *логометрические* магнитоэлектрические механизмы. В магнитоэлектрических логометрических механизмах (рис. 5.2) в поле постоянного магнита находится подвижная часть из двух жестко укрепленных на оси рамок 1 и 2. Токи I_1 и I_2 подводятся к рамкам с помощью тонких токопроводов с ничтожной упругостью. Противодействующие моменты, обусловленные ими, малы, и их можно не учитывать. Токи направлены так, что на рамки действуют моменты, направленные в противоположные стороны (один можно считать вращающим,

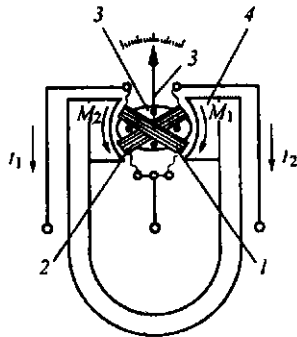


Рис. 5.2. Магнитоэлектрический логометрический механизм: 1 — вращающаяся рамка; 2 — противодействующая рамка; 3 — сердечник; 4 — полюсной наконечник

а другой — противодействующим). Пружины, создающие противодействующий момент, здесь не нужны. Форма сердечника 3 и полюсных наконечников 4, выполненных из магнитомягкого материала, выбирается такой, чтобы индукция в воздушном зазоре была неравномерной и направленной нерадиально. Индукция в местах расположения активных сторон рамок соответственно равна: $B_1 = f_1(\alpha)$ и $B_2 = f_2(\alpha)$, тогда моменты, действующие на подвижную часть, можно выразить следующим образом:

$$M_1 = I_1 F_1(\alpha); \quad M_2 = -I_2 F_2(\alpha). \quad (5.6)$$

Подвижная часть занимает положение установившегося отклонения, соответствующее условию $M_1 = -M_2$ или $I_1 F_1(\alpha) = I_2 F_2(\alpha)$, откуда

$$I_1/I_2 = F_2(\alpha)/F_1(\alpha) = F_3(\alpha),$$

или

$$\alpha = F(I_1/I_2). \quad (5.7)$$

Таким образом, логометр измеряет отношение токов, протекающих в обмотках рамок.

5.3. Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы

Для использования измерительных механизмов магнитоэлектрической системы в качестве амперметров и вольтметров могут потребоваться шунты и добавочные резисторы, описанные в 4.1.

В простейшем приборе для измерения тока, построенном на магнитоэлектрическом механизме, весь измеряемый ток протекает по обмотке рамки с сопротивлением R_0 (рис. 5.3, а). По такой схеме выполняют приборы для измерения малых токов — микроамперметры и миллиамперметры (с верхним пределом измерения 30...50 мА). На показаниях этих приборов не сказывается изменение температуры окружающей среды, так как при любом сопротивлении обмотки прибор измерит тот ток, который протекает по ней.

В приборах на большие токи используются шунты (рис. 5.3, б). У приборов с шунтом при изменении температуры окружающей среды происходит перераспределение токов в па-

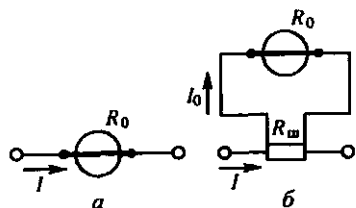


Рис. 5.3. Схемы магнитоэлектрических амперметров: *a* — на малые токи; *б* — на большие токи

раллельных ветвях, появляется температурная погрешность. Медь, как и все чистые металлы, имеет положительный температурный коэффициент сопротивления (ТКС), т. е. с повышением температуры электрическое сопротивление медного проводника увеличивается. Простейшим способом уменьшения влияния температуры является включение последовательно с обмоткой рамки добавочного резистора R_1 из манганина (рис. 5.4), при этом уменьшается температурный коэффициент цепи рамки, так как в диапазоне температур $0...200\text{ }^\circ\text{C}$ манганин имеет отрицательный ТКС.

Для построения вольтметра на базе магнитоэлектрического механизма измеряемое напряжение должно быть преобразовано в пропорциональный ему ток. Для этого последовательно с измерительным механизмом включают добавочный резистор R_n (рис. 5.5).

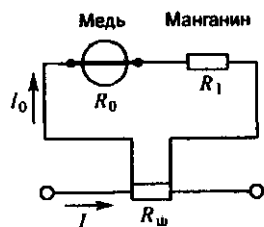


Рис. 5.4. Схема уменьшения температурной погрешности

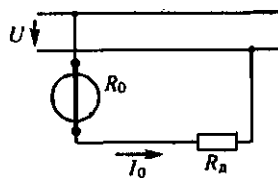


Рис. 5.5. Схема магнитоэлектрического вольтметра

Значение сопротивления для измерения напряжения U определяется по формуле

$$I_0 = U / (R_0 + R_n), \quad (5.8)$$

где I_0 — ток полного отклонения; R_0 — сопротивление механизма.

Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры являются наиболее точными, обладают высокой чувствительностью, малым собственным потреблением мощности, имеют равномерную шкалу. На них слабо влияют внешние магнитные поля.

Недостатки этих приборов — пригодность только для работы на постоянном токе, чувствительность к перегрузкам, сравнительно высокая стоимость.

Отечественная промышленность выпускает магнитоэлектрические амперметры и вольтметры щитовые и переносные, однопредельные и многопредельные всех классов точности от 0,1.

5.4. Электродинамические и ферродинамические механизмы

Работа измерительных механизмов *электродинамической системы* (рис. 5.6) основана на взаимодействии магнитных полей двух катушек с токами — неподвижной и подвижной.

Подвижная катушка 1 измерительного механизма электродинамической системы, укрепленная на оси 3 или растяжках, мо-

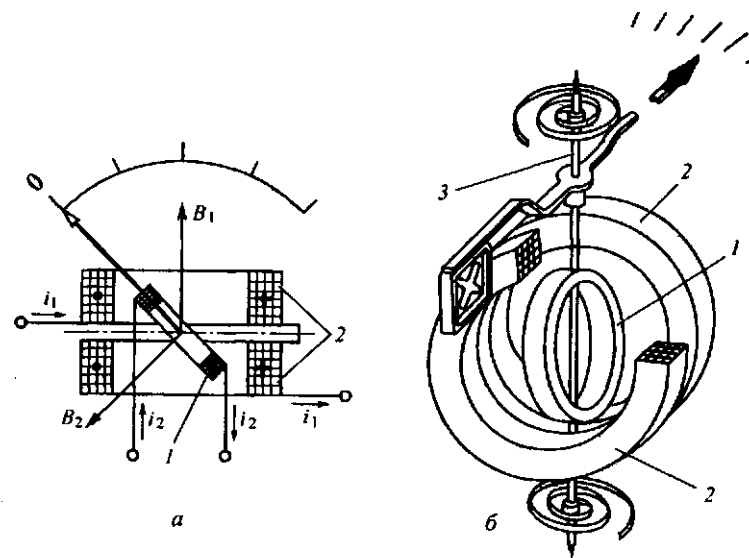


Рис. 5.6. Электродинамический измерительный механизм: *a* — устройство; внешний вид. 1 — подвижная катушка; 2 — неподвижная катушка; 3 — ось

жет поворачиваться внутри неподвижной. При протекании в обмотках катушек токов i_1 и i_2 возникают электромагнитные силы, стремящиеся так повернуть подвижную часть, чтобы магнитные потоки B_1 и B_2 подвижной и неподвижной катушек совпали.

Неподвижная катушка 2 обычно выполняется из двух одинаковых частей, разделенных воздушным зазором. Благодаря этому обеспечиваются требуемая конфигурация магнитного поля и удобство расположения оси. Неподвижная и подвижная катушки механизма (обычно бескаркасные) имеют круглую или прямоугольную форму и изготавливаются из медного или алюминиевого провода. Подвижная катушка укрепляется на опорах или растяжках. Для подвода тока к подвижной катушке используются спиральные пружины или растяжки.

Собственное магнитное поле электродинамических механизмов, силовые линии которого замыкаются по воздуху, невелико. На электродинамические механизмы влияют внешние магнитные поля. Для защиты от них применяется экранирование, т. е. измерительный механизм помещают внутри одного или двух экранов из ферромагнитного материала. Успокоение — воздушное или магнитоиндукционное (при наличии экранирования от поля рассеяния постоянного тормозного магнита).

Энергия магнитного поля двух катушек с токами I_1 и I_2

$$W_m = L_1 I_1^2 / 2 + L_2 I_2^2 / 2 + M_{12} I_1 I_2, \quad (5.9)$$

где L_1 и L_2 — индуктивность катушек; M_{12} — взаимная индуктивность катушек.

В (5.14) только взаимная индуктивность M_{12} зависит от угла поворота подвижной части, поэтому вращающий момент равен:

$$M = dW_m / d\alpha = I_1 I_2 dM_{12} / d\alpha. \quad (5.10)$$

При протекании по катушкам переменных токов $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$ и $i_2 = I_{2m} \sin(\omega t - \psi)$ подвижная часть из-за инерционности будет реагировать на среднее значение вращающего момента:

$$\begin{aligned} M_{cp} &= \frac{1}{T_0} \int_0^T m dt = \frac{dM_{12}}{d\alpha} \frac{1}{T_0} \int_0^T I_{1m} I_{2m} \sin \omega t \sin(\omega t - \psi) dt = \\ &= I_1 I_2 \cos \psi dM_{12} / d\alpha, \end{aligned} \quad (5.11)$$

где I_1 и I_2 — действующие значения токов.

Таким образом, вращающий момент пропорционален произведению действующих значений токов в катушках и косинусу угла сдвига фаз между ними. Следовательно, электродинамический механизм обладает фазочувствительными свойствами. Поэтому он может быть использован не только для измерения тока и напряжения, но и мощности.

Если противодействующий момент создается упругими элементами, то для режима установившегося отклонения ($M = -M_{пр}$) получим:

$$I_1 I_2 \cos \psi dM_{12} / d\alpha = W\alpha,$$

откуда для механизма прибора, работающего на переменном токе,

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 \cos \psi dM_{12} / d\alpha. \quad (5.12)$$

Следовательно, характер шкалы прибора зависит от произведения $I_1 I_2 \cos \psi$ и $dM_{12} / d\alpha$. Взаимная индуктивность между катушками определяется формой, размерами и их взаимным расположением, т. е. $M_{12} = f(\alpha)$.

При протекании по катушкам постоянных токов I_1 и I_2 уравнение преобразования можно представить следующим выражением:

$$\alpha = \frac{1}{W} I_1 I_2 dM_{12} / d\alpha. \quad (5.13)$$

Основными достоинствами электродинамических механизмов являются одинаковые показания на постоянном и переменном токе (при последовательном соединении катушек), что позволяет с большой точностью градуировать их на постоянном токе, а также стабильность показаний во времени.

Недостатками электродинамических механизмов являются невысокая чувствительность, большое собственное потребление мощности, чувствительность к перегрузкам.

Указанные свойства электродинамических механизмов позволяют на их основе выпускать лабораторные многопредельные приборы высоких классов точности (0,5; 0,2; 0,1) для измерений на постоянном и переменном токе. Выпускаются миллиамперметры и амперметры с пределами от 1 мА до 10 А на частоты до 10 кГц, многопредельные вольтметры с пределами от 1,5

до 600 В на частоты до 5 кГц с током полного отклонения от 60 до 3 мА, многопредельные однофазные ваттметры с пределами по току от 25 мА до 10 А и по напряжению от 15 до 600 В.

Механизмы ферродинамической системы отличаются от рассмотренных электродинамических механизмов тем, что неподвижная катушка имеет магнитопровод из магнитомягкого листового материала.

На рис. 5.7 изображены две конструкции ферродинамических механизмов: однокатушечная и двухкатушечная. Благодаря наличию магнитопровода магнитный поток и, следовательно, вращающий момент существенно возрастают, поэтому *магнитодвижущая сила* (МДС) катушки может быть снижена и, следовательно, уменьшено собственное потребление мощности механизма.

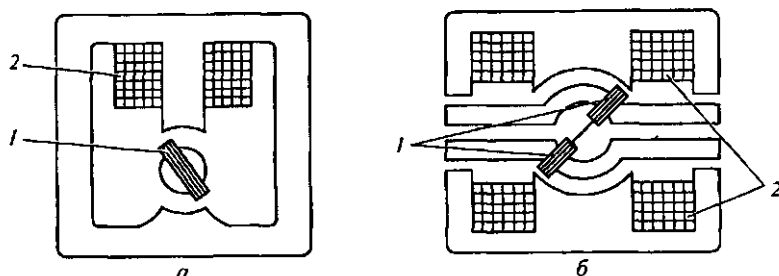


Рис. 5.7. Конструкции ферродинамических механизмов: а — однокатушечного, б — двухкатушечного

Подвижная катушка в ферродинамических механизмах выполняется на каркасе из диэлектрика либо бескаркасной во избежание появления в каркасе индуцированных токов. Противодействующий момент создается пружинами, т. е. $M_{пр} = -W\alpha$.

Собственное магнитное поле в ферродинамических механизмах сильное, поэтому внешние магнитные поля на них влияют слабо. Конструкции механизмов, изображенные на рис. 5.9 особенно хорошо защищены, так как магнитопровод одновременно является экраном. Успокоители применяются магнитоиндукционные и жидкостные.

Наличие магнитопровода обуславливает появление погрешности из-за нелинейности магнитных свойств материала сердечника и вихревых токов, поэтому ферродинамические приборы обладают большей основной погрешностью, чем электродинамические.

Неподвижная катушка 2 (см. рис. 5.7) в ферродинамическом механизме располагается на магнитопроводе, а подвижная катушка 1, укрепленная на оси, перемещается в воздушном зазоре с равномерным и радиальным магнитным полем.

Достоинствами ферродинамических приборов являются меньшая, чем у электродинамических, восприимчивость к внешним магнитным полям, меньшее собственное потребление мощности, больший вращающий момент. Однако точность и частотный диапазон у них ниже, чем у электродинамических.

Указанные свойства ферродинамических приборов определяют область их применения — в качестве щитовых и переносных приборов переменного тока, а также в качестве самопишущих приборов.

Отечественная промышленность выпускает тряско-, вибро- и ударопрочные щитовые ферродинамические амперметры и вольтметры классов точности 1,5 и 2,5, переносные амперметры и вольтметры класса 0,5, щитовые и переносные ваттметры классов точности 0,2 и 0,5. Применяются они преимущественно на переменном токе промышленной частоты.

5.5. Амперметры и вольтметры электродинамической и ферродинамической систем

Наиболее простая измерительная цепь у измерителя тока — миллиамперметра электродинамической системы, изображенного на рис. 5.8, а. Весь измеряемый ток проходит через неподвижную 1 и подвижную 2 катушки, соединенные последовательно.

У амперметров на токи от 0,5 А и выше катушки соединяются параллельно (рис. 5.8, б). Сопротивления параллельных цепей подобраны так, чтобы ток I_2 не превышал допустимого значения.

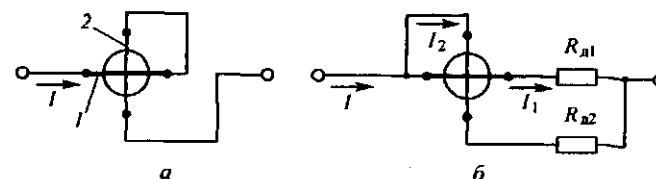


Рис. 5.8. Принципиальные схемы электродинамических амперметров

Для создания двухпредельного амперметра неподвижная катушка делается из двух одинаковых секций, переключая которые с последовательного соединения на параллельное, получают пределы измерения с соотношением токов 1 : 4.

У электродинамических вольтметров неподвижная и подвижная катушки соединены последовательно вместе с добавочным резистором (рис. 5.9).

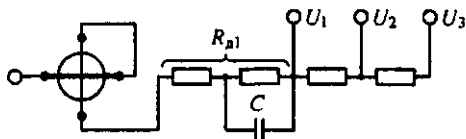


Рис. 5.9. Схема электродинамического вольтметра

Секционированием добавочного резистора можно получить разные пределы измерения.

Для получения шкалы, близкой к равномерной, у амперметров и вольтметров размеры подвижной катушки выбирают так, чтобы подвижная катушка находилась в практически однородном магнитном поле. В результате удается в амперметрах и вольтметрах электродинамической системы получить приблизительно равномерную шкалу, за исключением ее начальной части.

На показания электродинамических амперметров и вольтметров оказывают влияние внешние магнитные поля, температура окружающей среды и частота тока.

В амперметрах с последовательным соединением катушек изменения их сопротивления при изменении температуры не влияют на показания, но имеющая при этом место некоторая температурная погрешность обусловлена изменением упругих свойств спиральных пружин или растяжек.

В амперметрах, имеющих параллельно соединенные катушки, из-за неодинакового изменения сопротивлений ветвей может возникнуть температурная погрешность за счет перераспределения токов I_1 и I_2 в параллельных ветвях. Для компенсации температурной погрешности путем подбора добавочных резисторов из манганина и меди делают равными температурные коэффициенты параллельных ветвей.

На показания амперметров с последовательной схемой соединения катушек влияние частоты невелико, и проявляется оно, начиная с сотен герц.

В амперметрах с параллельным соединением катушек из-за разного соотношения активных и реактивных сопротивлений ветвей и влияния взаимной индуктивности между катушками появляется частотная погрешность. Для уменьшения частотной погрешности с помощью R_{a1} и R_{a2} (рис. 5.8, б) делают одинаковыми постоянные времени параллельных цепей, т. е. $L_1/R_1 = L_2/R_2$, где L_1 и L_2 — индуктивности, а R_1 и R_2 — активные составляющие полных сопротивлений параллельных цепей.

В вольтметрах электродинамической системы температурная погрешность обусловлена изменением сопротивлений катушек и упругости пружин и растяжек. Поэтому температурная погрешность, обусловленная изменением сопротивлений катушек, тем меньше, чем больше сопротивление добавочного резистора из манганина по сравнению с сопротивлением катушек.

Изменение частоты вызывает изменение реактивной составляющей полного сопротивления цепи вольтметра и создает частотную погрешность. Для компенсации этой погрешности часть добавочного сопротивления шунтируется конденсатором с емкостью C (рис. 5.9).

В ферродинамических приборах температурная погрешность обусловлена теми же причинами, что и в электродинамических, а также изменениями потерь в магнитопроводе.

Влияние изменения частоты на ферродинамические приборы больше, чем на электродинамические, из-за большей индуктивности катушек. Компенсация частотной погрешности осуществляется подключением конденсатора, как и в схеме на рис. 5.9.

5.6. Ваттметры электродинамической и ферродинамической систем

Для измерения мощности постоянного и переменного тока на практике широко применяются электродинамические и ферродинамические ваттметры. Вращающий момент, вызывающий отклонение подвижной части прибора и соединенной с ней стрелки (указателя), при постоянном токе пропорционален произведению силы тока на напряжение, а при переменном токе — также косинусу угла сдвига фаз между током и напряжением.

При измерении мощности постоянного тока неподвижная катушка (обе секции) включается последовательно с нагрузкой (рис. 5.10, а), и по ней проходит ток нагрузки I . Поэтому она называется последовательной цепью ваттметра.

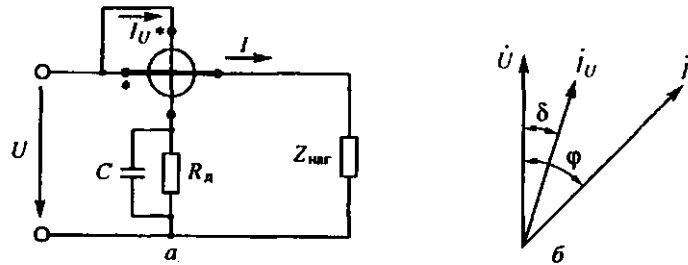


Рис. 5.10. Электродинамический ваттметр: а — схема измерительной цепи; б — векторная диаграмма

К подвижной катушке, соединенной последовательно с добавочным резистором R_d , подводится напряжение U , и по ней проходит ток $I_U = U/R_U$, где R_U — полное сопротивление параллельной цепи.

Для ваттметра, включенного в цепь постоянного тока, в соответствии с (5.13) имеем:

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{U}{R_U} I \frac{dM_{12}}{d\alpha} = \frac{k_1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} P. \quad (5.14)$$

Из (5.14) видно, что при условии $dM_{12}/d\alpha = \text{const}$ шкала ваттметра будет равномерной.

В электродинамическом ваттметре равномерность рабочего участка шкалы обеспечивается путем выбора определенных соотношений размеров катушек и их начального взаимного расположения.

При включении ваттметра в цепь переменного тока с напряжением $u = U_m \sin \omega t$ и током нагрузки $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$ ток в параллельной цепи равен:

$$i_U = U_m \sin(\omega t - \delta)/z_U,$$

где z_U — полное сопротивление параллельной цепи; δ — угол отставания по фазе тока i_U от напряжения U из-за наличия индуктивности в параллельной цепи (рис. 5.10, б).

В этом случае, принимая во внимание (5.12),

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{UI}{z_U} \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cos(\varphi - \delta).$$

Учитывая, что $dM_{12}/d\alpha = \text{const}$, $z_U = R_U/\cos \delta$, получаем:

$$\alpha = \frac{k_1}{W} UI \cos \delta \cos(\varphi - \delta), \quad (5.15)$$

т. е. отклонение α будет пропорционально активной мощности при условии, что $\delta = 0$ ($z_U = R_U$). Следовательно, ток в параллельной цепи должен совпадать по фазе с напряжением (параллельная цепь должна иметь активное сопротивление), тогда

$$\alpha = k_2 UI \cos \varphi = k_2 P. \quad (5.16)$$

Угол δ можно сделать малым лишь в некоторой области частот, шунтируя добавочный резистор R_d (или его часть) в параллельной цепи ваттметра (см. рис. 5.10, а) конденсатором C .

Выполнение условия $z_U = R_U$ позволяет производить поверку и градуировку ваттметра с высокой точностью на постоянном токе.

Дополнительные погрешности у электродинамических ваттметров могут быть вызваны влиянием температуры, частоты переменного тока, внешних магнитных полей.

Влияние температуры сказывается на изменении параметров цепи подвижной катушки и упругости пружин и аналогично влиянию температуры на вольтметры электродинамической системы.

Изменение частоты приводит к изменению полного сопротивления цепи подвижной катушки и, следовательно, к изменению значения тока I_U . Кроме того, появляется угловая (фазовая) погрешность. Ток I_U отстает по фазе от напряжения U , что вызывает ощутимую погрешность ваттметра. Для уменьшения угловой погрешности применяют частотную компенсацию.

Для защиты от влияний внешних магнитных полей электродинамические ваттметры экранируют.

В ваттметрах направление отклонения указателя изменяется при изменении полярности тока или напряжения. При одновременном изменении полярности тока и напряжения знак вра-

щающего момента и направление отклонения указателя не изменяются, а при изменении полярности тока или напряжения указатель отклоняется в другую сторону. Поэтому зажимы последовательной и параллельной цепей ваттметра имеют разметку. Зажимы, обозначенные звездочкой (*), называются генераторными и должны включаться в линию со стороны источника электроэнергии.

Электродинамические ваттметры обычно выполняются многопредельными как по току, так и по напряжению. Для реализации переключения пределов измерения неподвижная катушка состоит из секций, соединяемых последовательно или параллельно, а в цепи подвижной катушки добавочный резистор выполняется секционированным так, чтобы получать несколько номинальных напряжений.

Градуются ваттметры в делениях так, что при номинальных токе $I_{ном}$, напряжении $U_{ном}$ и $\cos \varphi = 1$ стрелка отклоняется на полное число делений шкалы $a_{шк}$ (100 или 150 дел.). Для определения измеренного значения мощности отсчитанное число делений надо умножить на цену деления $C_{ном}$, которая для каждого предела измерения рассчитывается по формуле

$$C_{ном} = U_{ном} I_{ном} / a_{шк}$$

Для измерений в цепях с малыми значениями $\cos \varphi$ применяют малокосинусные ваттметры, у которых отклонение стрелки на всю шкалу имеет место при $I_{ном} U_{ном}$ и $\cos \varphi = 0,1$ или $\cos \varphi = 0,2$. Номинальное значение $\cos \varphi$ обозначено на шкале.

Ферродинамический однофазный ваттметр включается в цепь аналогично электродинамическому ваттметру (рис. 5.10).

Ферродинамический ваттметр по сравнению с электродинамическим имеет больший магнитный поток и, следовательно, мало восприимчив к внешним магнитным полям, имеет меньшее собственное потребление мощности и большую чувствительность, более устойчив к механическим воздействиям, но ему присущи специфические погрешности от влияния вихревых токов и нелинейности кривой намагничивания. Эти погрешности снижают точность ферродинамических ваттметров, поэтому они выпускаются в качестве щитовых приборов классов точности не лучше 1,5. Трехфазные ферродинамические ваттметры активной и реактивной мощности бывают двухэлементные и трехэлемент-

ные. Первые применяются для измерения мощности в трехфазных трехпроводных цепях, а вторые — в трехфазных четырехпроводных цепях. Они состоят из двух или трех однофазных элементов, имеющих общую ось с укрепленными на ней подвижными катушками. Вращающий момент такого прибора равен алгебраической сумме вращающих моментов отдельных элементов.

5.7. Механизмы электромагнитной системы

Работа электромагнитных измерительных механизмов основана на взаимодействии магнитного поля, созданного неподвижной катушкой, по обмотке которой протекает измеряемый ток, с одним или несколькими ферромагнитными сердечниками, эксцентрично укрепленными на оси. Наибольшее распространение получили измерительные механизмы с плоской катушкой, с круглой катушкой и с замкнутым магнитопроводом.

Измерительный механизм с плоской катушкой (рис. 5.11) состоит из катушки 2 с обмоткой из медного провода и сердечни-

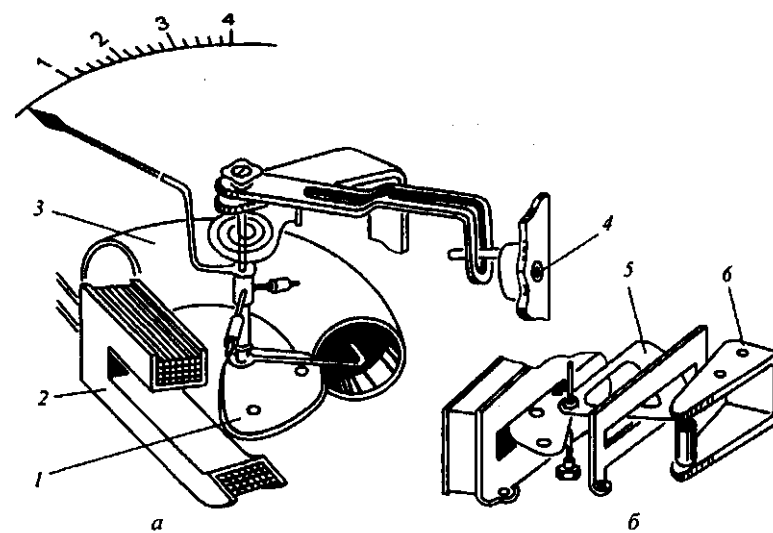


Рис. 5.11. а — электромагнитный механизм с плоской катушкой; 1 — сердечник; 2 — катушка; 3 — успокоитель; 4 — корректор нуля; 5 — алюминиевая пластинка; 6 — постоянный магнит; 7 — магнитоиндукционный успокоитель

ка 1. Сердечник из ферромагнитного материала с высокой магнитной проницаемостью и малой коэрцитивной силой укрепляется на оси с опорами или на растяжках. Противодействующий момент создается спиральной пружиной или растяжками. Успокоение воздушное (рис. 5.11, а) или магнитоиндукционное (рис. 5.11, б).

В механизмах с круглой катушкой (рис. 5.12) подвижный сердечник 1, укрепленный на оси, и неподвижный 2 располагаются внутри катушки. При протекании тока в обмотке катушки оба сердечника намагничиваются одноименно и отталкиваются друг от друга. Поэтому подвижный сердечник вместе с осью и другими деталями, укрепленными на ней, поворачивается на некоторый угол.

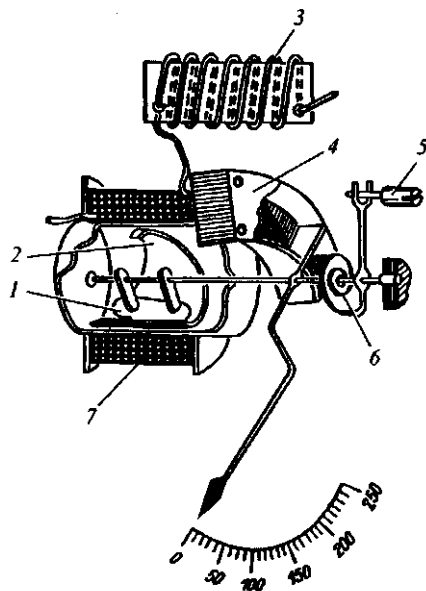


Рис. 5.12. Электромагнитный механизм с круглой катушкой: 1 — подвижный сердечник; 2 — неподвижный сердечник; 3 — добавочный резистор; 4 — успокоитель; 5 — корректор нуля; 6 — спиральная пружина; 7 — катушка

Механизмы с замкнутым магнитопроводом (рис. 5.13) меньше подвержены влиянию внешних магнитных полей на подвижный сердечник, более чувствительны к протекающему через катушку току, но более трудоемки в производстве.

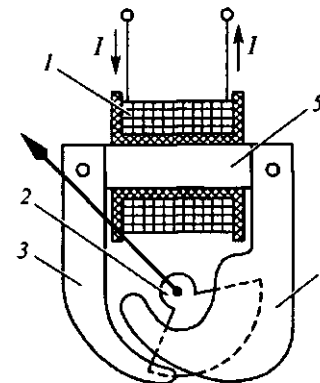


Рис. 5.13. Электромагнитный механизм с замкнутым магнитопроводом: 1 — катушка; 2 — подвижный сердечник; 3 и 4 — полюсные наконечники; 5 — неподвижный магнитопровод

Катушка 1 расположена на неподвижном магнитопроводе 5 с двумя парами полюсных наконечников 3 и 4. Магнитопровод и полюсные наконечники выполнены из магнитомягкого материала. Подвижный сердечник 2 из магнитомягкой стали или пермаллоя, укрепленный на растяжках, может перемещаться в зазоре между полюсными наконечниками.

При протекании тока через катушку возникает магнитное поле, которое, воздействуя на подвижный сердечник 2, стремится расположить его так, чтобы энергия поля была наибольшей. Энергия магнитного поля электромагнитного механизма, имеющего катушку с током I , равна $W_m = \frac{1}{2} I^2 L$, где L — индуктивность катушки; I — ток в обмотке, вращающий момент равен

$$M = \frac{dW_m}{d\alpha} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2.$$

При протекании в обмотке катушки переменного тока $i = I_m \sin \omega t$ подвижная часть из-за своей инерционности будет реагировать на среднее значение вращающего момента, равное

$$M_{cp} = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2,$$

где I — действующее значение переменного тока в обмотке.

Из условия статического равновесия $M = -M_{\text{пр}}$ или $\frac{1}{2} \frac{dL}{d\alpha} I^2 = W\alpha$ получается выражение для угла отклонения подвижной части

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dL}{d\alpha} I^2,$$

откуда видно, что шкала у электромагнитного измерительного прибора неравномерна. Для уменьшения неравномерности шкалы форму сердечника подбирают так, чтобы шкала была практически равномерна, начиная с 15...20 % ее конечного значения.

При работе механизма электромагнитной системы на переменном токе в окружающих металлических частях и сердечнике возникают вихревые токи, размагничивающие сердечник. Из-за этого показания на переменном токе немного меньше, чем на постоянном. Указанное различие в показаниях увеличивается с ростом частоты, но на частоте $f = 50$ Гц оно невелико.

Магнитное поле в электромагнитных механизмах без магнитопроводов, замыкающееся в основном по воздуху, невелико, поэтому внешние магнитные поля существенно влияют на показания приборов с такими механизмами. Для уменьшения влияния внешних магнитных полей применяют экранирование. В механизмах с магнитопроводом собственное магнитное поле значительно сильнее, чем внешнее, поэтому экранировать приборы с такими механизмами не надо.

Недостатки электромагнитных механизмов — неравномерная шкала, влияние внешних магнитных полей на механизмы без магнитопровода и большое собственное потребление мощности.

Достоинства электромагнитных механизмов — способность работать на постоянном и переменном токе, устойчивость к токовым перегрузкам, простота конструкции.

Благодаря отмеченным достоинствам электромагнитные механизмы используются в технических щитовых амперметрах и вольтметрах класса точности 1,0 и более низких классов для измерений в цепях переменного тока. Кроме того, они применяются в переносных многопредельных приборах класса точности 0,5.

Электромагнитные амперметры и вольтметры. В амперметрах электромагнитной системы весь измеряемый ток проходит

по катушке измерительного механизма. Значение номинальной магнитодвижущей силы (МДС), необходимой для создания магнитного поля в зазоре катушки, составляет: 100 А в механизмах, подвижная часть которых крепится на опорах; 50 А в механизмах с подвижной частью, укрепленной на растяжках; 20 А в механизмах с замкнутым магнитопроводом. Поэтому для расширения диапазонов измерения электромагнитных однопредельных амперметров одного типа необходимо уменьшить число витков катушки. В амперметре на номинальный ток 100 А катушка имеет один виток, выполненный из толстой медной шины. Такие амперметры для прямого включения на токи больше 200 А не изготовляют из-за нагрева шины и сильного влияния на показания прибора магнитного поля токоподводящих проводов. Диапазоны измерения электромагнитных амперметров, работающих на переменном токе, проще расширять с помощью измерительных трансформаторов тока.

Электромагнитные щитовые амперметры обычно выпускаются однопредельными, а переносные — многопредельными (до четырех пределов измерения).

Для расширения диапазонов измерения переносных многопредельных электромагнитных амперметров катушки выполняют секционированными. Секции включаются в последовательно-параллельные комбинации.

Температурная погрешность у электромагнитных амперметров невелика и обусловлена только изменением упругости спиральной пружины или растяжек. Изменение сопротивления обмотки катушки из-за влияния внешней температуры не вызывает погрешности, так как весь измеряемый ток проходит по обмотке.

Дополнительная частотная погрешность в электромагнитных амперметрах из-за вихревых токов в сердечнике и поверхностного эффекта в проводах обмотки также невелика.

В вольтметрах электромагнитной системы последовательно с катушкой измерительного механизма включается добавочный безреактивный резистор R_x , выполненный из манганина (рис. 5.14).

Добавочные резисторы могут быть внутренними и наружными. В многопредельных

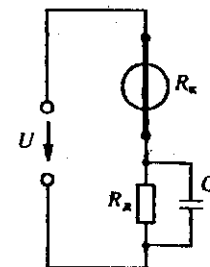


Рис. 5.14. Схема электромагнитного вольтметра

вольтметрах добавочные резисторы делают секционированными. Для компенсации температурной погрешности у вольтметров необходимо, чтобы отношение сопротивления добавочного резистора из манганина к сопротивлению катушки из меди было достаточно велико (не меньше значения, обеспечивающего класс точности прибора). Обычно у вольтметров на напряжение большее 100 В это условие соблюдается, и их диапазоны измерения расширяются за счет изменения сопротивлений добавочных резисторов при неизменном токе полного отклонения.

Имеются конструкции вольтметров с замкнутым магнитопроводом, у которых катушка намотана манганиновым проводом, а добавочный резистор отсутствует. Показания таких вольтметров мало зависят от температуры.

Изменение частоты сказывается на показаниях вольтметров больше, чем на показаниях амперметров, так как катушки вольтметров имеют значительно большее количество витков и, следовательно, индуктивность. С повышением частоты тока увеличивается реактивная составляющая сопротивления катушки вольтметра, вызывающая уменьшение тока в цепи прибора, и показания его уменьшаются. Поэтому для расширения частотного диапазона необходимо вводить частотную компенсацию с помощью включения конденсатора параллельно части добавочного резистора, как и в электродинамическом вольтметре (см. рис. 5.9).

Электромагнитные вольтметры и амперметры обладают следующими достоинствами: они пригодны для работы на постоянном и переменном токе, устойчивы к токовым перегрузкам, имеют простую конструкцию.

Их недостатками являются некоторая неравномерность шкалы, зависимость показаний от внешних магнитных полей, большое собственное потребление мощности (за исключением приборов с замкнутым магнитопроводом).

Существуют также электромагнитные перегрузочные амперметры, вольтметры номинального значения и нулевые вольтметры.

Отечественная промышленность выпускает: переносные амперметры класса точности 0,5 с верхними пределами измерений от 10 мА до 10 А на частоты до 1500 Гц; щитовые однопредельные амперметры классов точности 1,0; 1,5; 2,5 на токи до 300 А

со встроенными трансформаторами тока и до 15 кА с наружными трансформаторами тока; переносные вольтметры класса точности 0,5 с верхними пределами измерений от 1,5 до 600 В; щитовые вольтметры классов точности 1,0; 1,5; 2,5 с верхними пределами измерений от 0,5 до 600 В непосредственного включения и до 450 кВ с трансформаторами напряжения на различные фиксированные частоты от 50 до 1000 Гц.

5.8. Электростатические механизмы и их применение

В электростатических механизмах перемещение подвижной части происходит под действием энергии электрического поля системы двух или нескольких электрически заряженных проводников. В этих механизмах в отличие от механизмов других систем перемещение подвижной части осуществляется за счет прямого действия приложенного напряжения. Поэтому в основном электростатические механизмы применяются в приборах, измеряющих напряжение, вольтметрах.

Перемещение подвижной части во всех конструкциях электростатических вольтметров связано с изменением емкости системы. Распространение получили два вида механизмов. В одних изменение емкости осуществляется за счет изменения активной площади электродов, а в других — за счет изменения расстояния между электродами. Первые применяются в щитовых и переносных вольтметрах на напряжения от десятков до сотен вольт, вторые — в щитовых киловольтметрах.

Устройство механизма с изменением активной площади электродов схематически показано на рис. 5.15, а. Неподвижная часть состоит из симметрично расположенных и электрически соединенных алюминиевых электродов 2. Секторообразные пластины 1 вместе с указателем 5, укрепленные на оси 3, образуют подвижную часть. Под действием подведенного к электродам напряжения U создается электрическое поле. Силы электрического поля, преодолевая противодействующий момент $M_{пр}$, создаваемый спиралью 3, стремятся повернуть подвижную часть так, чтобы подвижный электрод втягивался в пространство между неподвижными электродами и поворачивал указатель. Чем

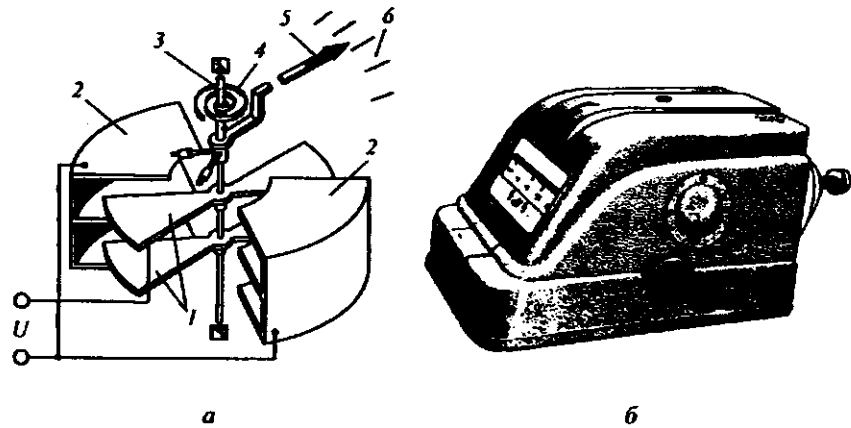


Рис. 5.15. Электростатические приборы: а — электростатический измерительный механизм (1 — подвижные пластины; 2 — неподвижные камеры; 3 — ось; 4 — пружина; 5 — стрелка; 6 — шкала); б — внешний вид прибора С96

больше будет угол поворота α , тем больше будет активная площадь пластин и, следовательно, больше емкость между подвижным и неподвижным электродом C и энергия электрического поля $W_3 = \frac{1}{2} U^2 C$.

Подвижная часть может бытькреплена на опорах, растяжках или на подвесе, а в качестве указателя кроме стрелки применяют также световой луч.

В электростатических механизмах применяют большей частью магнитоиндукционные успокоители, реже — воздушные.

Вращающий момент электростатического механизма равен:

$$M = \frac{dW_3}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}.$$

При переменном напряжении $u = U_m \sin \omega t$, приложенном к электродам, подвижная часть из-за инерционности будет реагировать на среднее за период значение вращающего момента, равное

$$M_{cp} = \frac{1}{2} \frac{dC}{d\alpha} \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha},$$

где U — действующее значение переменного напряжения.

Формулу для угла отклонения можно получить из условия статического равновесия $M = -M_{np}$:

$$\frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha} = W\alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{1}{2W} \frac{dC}{d\alpha} U^2.$$

Таким образом, угол поворота подвижной части электростатического вольтметра пропорционален квадрату действующего значения напряжения и множителю $dC/d\alpha$, т. е. шкала вольтметра неравномерна. Путем выбора соответствующей формы электродов, их размеров и взаимного расположения получают зависимость $dC/d\alpha$, которая позволяет обеспечить практически равномерную шкалу от 15 до 100 % верхнего предела измерения. Вращающий момент электростатического механизма мал, что не позволяет на его базе сделать вольтметр с пределом измерения меньше 10 В.

Собственное электрическое поле электростатического вольтметра незначительно, поэтому на работу прибора сильное влияние оказывают внешние электрические поля. Для уменьшения этого влияния приборы экранируют. Экраном может служить металлический корпус прибора. Если корпус выполнен из пластмассы, то экраном служит металлическая фольга из немагнитного материала или алюминиевая краска, которой покрывается внутренняя поверхность корпуса. Экран соединяется с одним из электродов и заземляется.

Чувствительность электростатических механизмов мала. Для ее повышения подвижную часть укрепляют на растяжках или на подвесе, применяют оптический световой отсчет, а также увеличивают емкость механизма, делая его многокамерным.

Электростатические вольтметры потребляют ничтожно малую мощность, имеют очень большое входное сопротивление (до десятков гигаом), работают как на постоянном токе, так и на переменном в диапазоне частот до десятков мегагерц, измеряют очень большие напряжения без использования громоздких добавочных резисторов и не подвержены влиянию внешних магнитных полей.

Примером таких приборов может служить киловольтметр С96 (рис. 5.15, б), имеющий пределы измерений 7,5; 15 и 30 кВ и работающий в диапазоне частот от 0 до 20 МГц. Погрешность 1,5 % гарантирована для постоянного и низкочастотного напряжения и возрастает до 5 % для частот выше 5 МГц. Входная емкость не выше 12 пФ, входное сопротивление не менее 10 ГОм. Вращающий момент мал, поэтому подвижную часть крепят на растяжках и применяют световой указатель, для питания осветительной лампочки которого необходимо напряжение сети 220 В или 6 В от любого источника. Измеряемое напряжение подают на вводной штырь, размещенный в фарфоровом изоляторе. Для перестановки предела измерений штырь перемещают, при этом изменяется расстояние между пластинами. Прибор заключен в литой металлический корпус, который служит электростатическим экраном и устраняет влияние внешних электрических полей. Перед работой с прибором его корпус следует заземлять, подключение к токонесущим проводникам с напряжением свыше 1000 В выполняется с помощью изолирующей штанги, в диэлектрических перчатках, стоя на изолирующем коврике или подставке на изоляторах или в диэлектрических ботах в присутствии второго лица.

Контрольные вопросы

1. На чем основана работа магнитоэлектрического механизма?
2. Каковы достоинства магнитоэлектрического механизма?
3. Какие механизмы пригодны для измерения как постоянного, так и переменного тока?
4. Почему электростатические механизмы применяются преимущественно для измерения высокого напряжения?

Глава 6

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

6.1. Общие сведения

В современных средствах измерения входной сигнал, несущий информацию об измеряемой величине, часто испытывает ряд преобразований. Цель этих преобразований — привести сигнал к виду, при котором возможно последующее измерение его информативных параметров с заданной точностью. Совокупность элементов средства измерений или измерительного канала, в результате которой обеспечивается осуществление всех преобразований сигнала, называется измерительной цепью. Элемент измерительной цепи, в котором осуществляется одно из ряда последовательных преобразований измерительного сигнала, называется *преобразовательным элементом* (ПЭ). Один или несколько преобразовательных элементов, конструктивно оформленные в самостоятельное изделие, называют *измерительным преобразователем* (ИП).

Преобразования сигналов могут быть различными:

- изменение физической природы сигнала, например преобразование сопротивления электрической цепи в ток или напряжение и т. п.;
- масштабирование, т. е. приведение сигнала к определенному диапазону изменения;
- линеаризация — операция, обеспечивающая линейную зависимость между информативными параметрами входного и выходного сигналов;
- фильтрация — отделение сигнала от помех, наложенных на сигнал;

- аналого-цифровое преобразование, т. е. преобразование непрерывной (аналоговой) формы сигнала в цифровой код. Существуют и другие преобразования входных сигналов.

Виды ПЭ и ИП, осуществляющих указанные преобразования, многочисленны. Остановимся на некоторых из них и рассмотрим наиболее важные свойства, общие для многих ПЭ и ИП, а также для измерительной цепи в целом. Рассмотрение вопроса начнем с изучения свойств простейших ИП, содержащих только один ПЭ.

6.2. Основные уравнения и свойства измерительных преобразователей

К основным метрологическим характеристикам ИП относят функцию преобразования, точность, чувствительность, разрешающую способность, входное и выходное сопротивления, быстроедействие.

Эти характеристики позволяют ответить на вопрос о принципиальной возможности применения данного ИП для выполнения требуемого измерительного преобразования в конкретной измерительной задаче.

Функция преобразования ИП. Выделим из измерительной цепи произвольный ИП. Обозначим через x его входную, а через y — выходную величины (рис. 6.1). Функция преобразования устанавливает связь между этими величинами:

$$y = F(x).$$

Функцию преобразования называют также характеристикой ИП. Измерительные преобразователи с нелинейной функцией преобразования называют функциональными преобразователями. Примером функционального преобразователя может служить лампа накаливания, если ее рассматривать как преобразователь приложенного напряжения в ток, протекающий через лампу. Дело в том, что увеличение тока в нити накаливания сопровождается повышением ее температуры и сопротивления. Поэтому зависимость между напряжением, приложенным к лампе, и

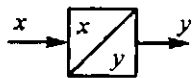


Рис. 6.1. Условное обозначение преобразователя

током, протекающим по ее нити накаливания, нелинейна. Другой пример функционального преобразователя — полупроводниковый диод.

Зависимость $y = F(x)$ преобразователей может быть задана аналитически, графиком или таблицей.

Преобразователи с функцией преобразования вида

$$y = ax + b, \quad (6.1)$$

где a и b — постоянные коэффициенты, называют линейными преобразователями. Для линейных преобразователей соблюдается постоянство коэффициентов a и b и их независимость от значения входной величины x . Коэффициент a называют коэффициентом преобразования или коэффициентом передачи входного сигнала на выход преобразователя.

Примером линейного преобразователя может служить делитель напряжения (рис. 6.2), для которого справедливо

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_1.$$

В данном случае $a = R_2 / (R_1 + R_2)$, $b = 0$.

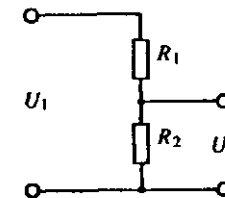


Рис. 6.2. Делитель напряжения

Другим примером линейного преобразователя может служить медный терморезистор, представляющий собой тонкую медную проволоку, навитую на каркас. Зависимость сопротивления такого преобразователя от окружающей температуры (функция преобразования) описывается уравнением

$$R_\theta = R_0 + R_0 \alpha \theta,$$

где R_θ — сопротивление терморезистора при температуре θ °С; R_0 — сопротивление терморезистора при $\theta = 0$ °С; α — температурный коэффициент сопротивления меди ($\alpha = 4,25 \cdot 10^{-3} 1/^\circ\text{C}$).

В данном случае $a = R_0 \alpha$, $b = R_0$.

В случае линейных цепей при преобразовании постоянных токов и напряжений выходные величины строго пропорциональны входным и коэффициент преобразования можно рассматривать как постоянную величину.

При преобразовании синусоидальных токов и напряжений в общем случае отличаются не только значения выходной и входной величин, но и их фазы. Поэтому коэффициент преобразования представляет собой комплексную величину и зависит от частоты.

Если изменяется одно из сопротивлений цепи, а напряжение цепи постоянно, то ток в нагрузке и напряжение на ней — функции изменения сопротивления. Такая цепь является функциональным преобразователем. Например, в цепях постоянного тока изменяющееся сопротивление (входная величина) и выходной ток или напряжение связаны гиперболической зависимостью. В цепях переменного тока зависимость между изменяющимся сопротивлением и выходным током более сложная.

К функции преобразования ИП предъявляются требования:

- соответствие индивидуальной функции преобразования номинальной. Индивидуальная функция преобразования характеризует свойства конкретного устройства, ее еще называют градуировочной характеристикой. При серийном выпуске однотипных изделий зависимость между значениями на выходе и входе средств измерений часто устанавливается с помощью номинальной функции преобразования. Ее использование сопровождается погрешностями, вызванными отличием номинальной функции преобразования от индивидуальной;
- стабильность во времени, а также при действии других влияющих величин.

Точность измерительного преобразователя. Реальная функция преобразования ИП отличается от номинальной. Обычно это отличие мало, но оно всегда есть. Степень отличия реальной функции преобразования от номинальной характеризует точность преобразования. Точность является оценочной характеристикой ИП. Различают высокую точность или низкую точность. Общепринятого количественного способа выражения точности не существует. Для этой цели пользуются понятием погрешность ИП, под которой понимают разность между его реальной и номинальной функциями преобразования. Различают погрешности

ИП по входу и выходу. При использовании ИП в измерительном канале при передаче измерительной информации интерес представляет погрешность ИП по входу. Если ИП используется в качестве меры, представляет интерес его погрешность по выходу. Погрешности ИП классифицируются по признакам, приведенным на рис. 6.3.

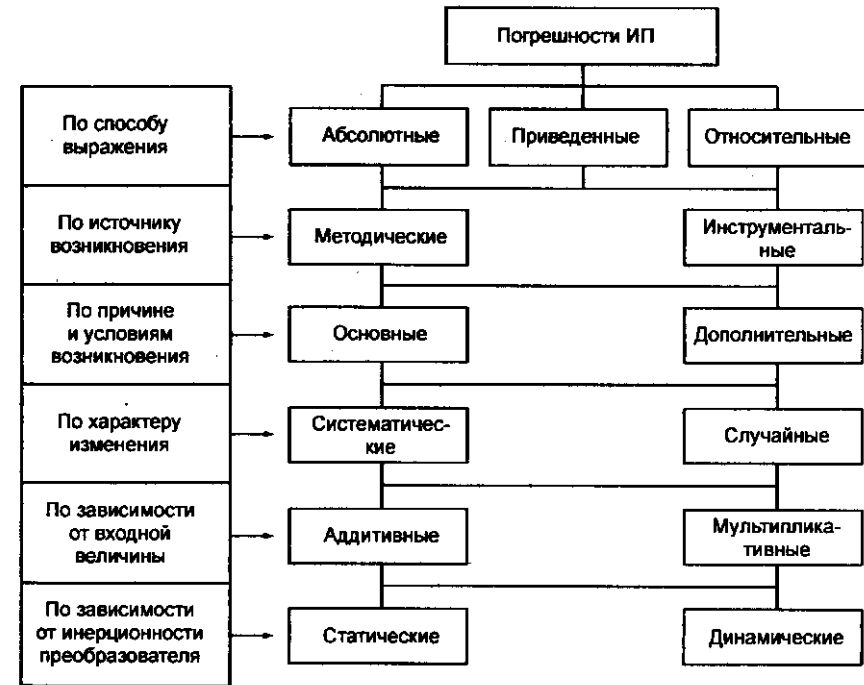


Рис. 6.3. Классификация погрешностей ИП

По способу выражения погрешности ИП разделяют на абсолютные, относительные и приведенные.

Абсолютной погрешностью ИП по входу Δ_x называют разность между истинными значениями выходной величины y , приведенной ко входу, и входной величины x :

$$\Delta_x = y/K_{\text{ном}} - x;$$

абсолютной погрешностью ИП по выходу Δ_y называют разность между значением входной величины, приведенной к выходу, и

истинным значением величины, соответствующей выходному сигналу:

$$\Delta_y = K_{\text{ном}} x - y,$$

где $K_{\text{ном}}$ — номинальный коэффициент преобразования. На практике, в связи с тем что истинные значения неизвестны, пользуются действительными значениями величин. Поэтому найти точное значение погрешности невозможно, и находят лишь оценки погрешностей, но слово «оценка» часто опускают.

Относительная погрешность ИП равна отношению абсолютной погрешности к истинному значению входной (δ_x — по входу) или выходной (δ_y — по выходу) величины и часто выражается в процентах:

$$\delta_x = \frac{\Delta_x}{x} 100\%; \quad \delta_y = \frac{\Delta_y}{y} 100\%.$$

Приведенная погрешность ИП определяется как отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению входной x_N или выходной y_N величины и выражается обычно в процентах:

$$\gamma_x = \frac{\Delta_x}{x_N} 100\%; \quad \gamma_y = \frac{\Delta_y}{y_N} 100\%.$$

Погрешности ИП делятся на методические и инструментальные. Методические погрешности — это составляющие погрешности ИП, обусловленные несовершенством метода измерительного преобразования. Например, нелинейный ИП со слабо выраженной нелинейностью может рассматриваться как линейный ИП, но при этом всегда будет методическая погрешность, обусловленная заменой нелинейной характеристики линейной. Инструментальные погрешности — составляющие погрешности ИП, обусловленные несовершенством его изготовления. Например, если в схеме делителя напряжения (см. рис. 6.2) сопротивления резисторов отличаются от номинальных, то возникает инструментальная составляющая погрешности коэффициента передачи делителя. По причине и условиям возникновения погрешности ИП делятся на основные и дополнительные. Основная погрешность — это погрешность ИП в нормальных условиях эксплуатации. Предел допустимой основной погреш-

ности — это наибольшая основная погрешность ИП, при которой он может быть признан годным и допущен к эксплуатации.

Нормальными условиями эксплуатации ИП называются условия, при которых влияющие величины находятся в пределах, установленных в стандартах или технических условиях на ИП данного типа. Под влияющими величинами понимаются физические величины, не являющиеся преобразуемыми данным ИП, но оказывающие влияние на результат преобразования входной величины. Например, окружающая температура может изменять сопротивление резисторов в схеме ИП и, таким образом, изменять его коэффициент преобразования; внешние электрические и магнитные поля создают помехи в цепях ИП, искажающие преобразуемую величину, и т. п.

В *рабочих условиях* применения значения влияющих величин выходят за пределы нормальных условий; работоспособность ИП сохраняется, но появляется дополнительная погрешность. Рабочие области значений влияющей величины также устанавливаются в стандартах или технических условиях на данный вид ИП, и в этой области нормируется дополнительная погрешность ИП. Если влияющая величина выходит за границы значений рабочей области, то применение данного ИП в таких условиях невозможно.

По характеру изменения погрешности ИП делятся на систематические и случайные. Под систематической погрешностью понимается составляющая погрешности ИП, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся. Случайная погрешность ИП — составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом. Примером систематических погрешностей могут служить методические погрешности, возникающие при замене нелинейной функции преобразования линейной, или инструментальные погрешности, вызванные неточной подгонкой сопротивлений резисторов, и др. Причинами случайных погрешностей могут служить различного рода наводки и помехи.

Деление погрешностей ИП на систематические и случайные в известной мере носит условный характер. Одна и та же причина (влияющая величина) может приводить как к систематическим, так и к случайным погрешностям. Покажем это на следующем примере. Пусть некоторый ИП используется для преобразования заданной входной величины в условиях переменной окружающей температуры. Если время работы ИП мало и окру-

жающая температура за это время не успевает заметным образом измениться, то погрешность преобразователя, обусловленная действием окружающей температуры, в таком эксперименте будет постоянной и должна рассматриваться как систематическая погрешность. Если же ИП работает длительно и окружающая температура многократно колеблется относительно некоторого среднего значения, то температурная погрешность ИП должна рассматриваться как случайная.

По зависимости от значения входного сигнала погрешности ИП делятся на аддитивные, т. е. не зависящие от значения входного сигнала, и мультипликативные, т. е. пропорциональные значению входного сигнала. Аддитивные погрешности вызываются смещением нулевых уровней ИП. Причинами аддитивных погрешностей могут быть начальное смещение и дрейф нулевого уровня, например, в измерительных усилителях, действие термо-ЭДС, шумы и различного рода наводки во входных цепях ИП и т. п. Источник аддитивной помехи всегда можно рассматривать как источник сигнала, не зависящий от значения преобразуемой величины и включенный во входную цепь ИП. Мультипликативные погрешности вызываются нестабильностью функций преобразования ИП. Например, в схеме делителя напряжения (см. рис. 6.2) отклонение сопротивлений резисторов от номинальных значений вызывает отклонение коэффициента передачи делителя от номинального значения, что приводит к мультипликативной погрешности. Суммарная абсолютная погрешность ИП Δ_{Σ} определяется суммой абсолютных значений аддитивной Δ_a и мультипликативной Δ_m составляющих погрешности:

$$\Delta_{\Sigma} = |\Delta_a| + |\Delta_m|.$$

Рассмотрим в качестве примера ИП *усилитель постоянного тока* (УПТ) с номинальным коэффициентом усиления $K_{\text{ном}}$ (рис. 6.4). Обозначим: $U_{\text{вх}}$ — входное напряжение, $U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение, $U_{\text{см}}$ — напряжение смещения усилителя. Входным током и инерционностью усилителя пренебрежем, но допустим, что действительный коэффициент усиления K отличается от номинального на значение ΔK . В таком случае ($U_{\text{см}}$ вызывает сме-

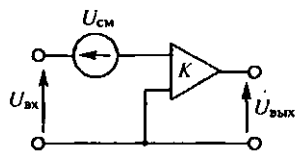


Рис. 6.4. Усилитель постоянного тока

щения смещения усилителя. Входным током и инерционностью усилителя пренебрежем, но допустим, что действительный коэффициент усиления K отличается от номинального на значение ΔK . В таком случае ($U_{\text{см}}$ вызывает сме-

щение характеристики усилителя: при $U_{\text{вх}} = 0$ $U_{\text{вых}} = U_{\text{см}} K \neq 0$, но это смещение не зависит от значения $U_{\text{вх}}$, следовательно, $U_{\text{см}}$ является источником аддитивной погрешности.

При наличии ΔK изменяется крутизна характеристики преобразования усилителя и появляется погрешность $U_{\text{вх}} \Delta K$, абсолютное значение которой пропорционально значению $U_{\text{вх}}$. Следовательно, нестабильность коэффициента усиления является источником мультипликативной погрешности.

Рассмотрим ИП с характеристикой вида $y = Kx$. Аддитивная и мультипликативная составляющие погрешности изменяют характеристику преобразования, как показано на рис. 6.5, а и б. На рис. 6.5, в показано суммарное действие этих погрешностей. На рис. 6.5, з—е представлены зависимости абсолютных погрешностей (Δ_a , Δ_m , Δ_{Σ}), а на рис. 6.5, ж—и — относительных погрешностей ИП (δ_a , δ_m , δ_{Σ}) от входной величины.

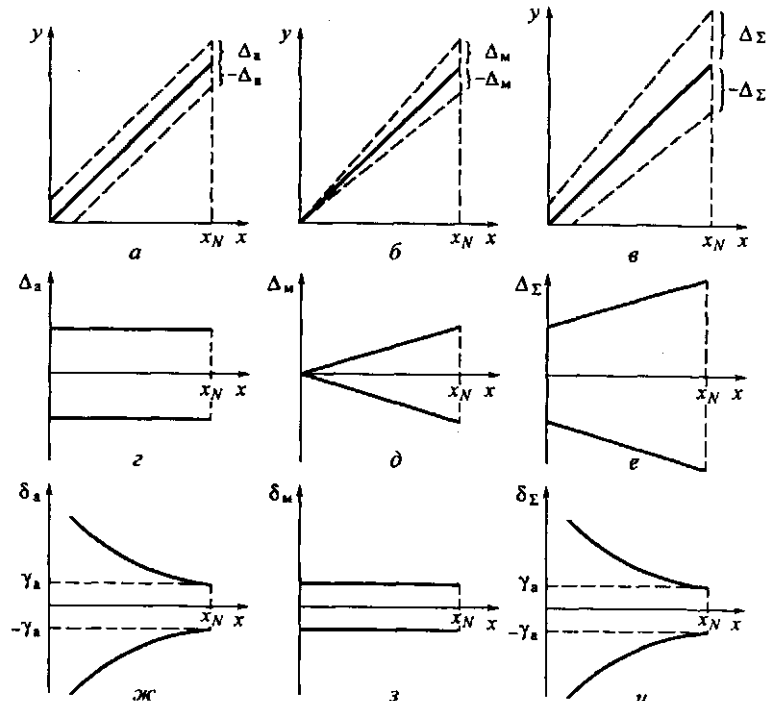


Рис. 6.5. Графики погрешностей ИП: а, з, ж — аддитивной; б, д, з — мультипликативной; в, е, и — суммарной

Относительная суммарная погрешность, приведенная ко входу ИП, может быть представлена в виде

$$\begin{aligned}\delta_{\Sigma} &= \frac{\Delta_{\Gamma}}{x} + \frac{\Delta_a}{x} + \frac{\Delta_M}{x} = \gamma_a \frac{x_N}{x} + \delta_M + \gamma_a - \gamma_a = \\ &= \delta_M + \gamma_a - \gamma_a \left(\frac{x_N}{x} - 1 \right) = c + d \left(\frac{x_N}{x} - 1 \right),\end{aligned}$$

где $c = \delta_M + \gamma_a$; $d = \gamma_a$.

Такая форма представления суммарной погрешности часто используется для описания метрологических свойств прецизионных ИП, например аналого-цифровых ИП.

По степени зависимости от инерционности ИП различают статические и динамические погрешности.

Статической погрешностью преобразователя называется постоянная во времени погрешность, не зависящая от инерционных свойств ИП.

Динамическая погрешность — это погрешность ИП, вызванная его инерционностью при преобразовании переменной во времени величины или при появлении скачка измеряемой величины в момент подключения к объекту измерения.

Чувствительность и порог чувствительности измерительного преобразователя. Чувствительностью измерительного преобразователя называется производная его выходной величины по входной. Обозначим Δy изменение выходной величины ИП, вызванное изменением входной величины Δx . Отношение

$$\Delta y / \Delta x = S_{cp} \quad (6.2)$$

называется средней чувствительностью ИП на интервале Δx . Предел, к которому стремится это отношение при $\Delta x \rightarrow 0$, называют чувствительностью ИП в точке x :

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}. \quad (6.3)$$

Наряду с термином «чувствительность измерительного преобразователя», используют также термины «коэффициент преобразования», «крутизна», «коэффициент передачи» и «коэффициент усиления», под которыми понимают отношение сигнала на

выходе измерительного преобразователя к значению вызывающего его сигнала на входе преобразователя.

В общем случае входная и выходная величины ИП могут быть неоднородными, поэтому и чувствительность ИП в общем случае является размерной величиной. Однако часто эти величины являются однородными, например в делителях или усилителях напряжения — это напряжения постоянного или переменного тока. В таких случаях чувствительность ИП является величиной безразмерной.

В зависимости от вида входной и выходной величин ИП можно говорить о разных видах его чувствительности. Например, если выходная величина ИП электрическая, то можно говорить о его чувствительности по току, напряжению, мощности, а также о чувствительности ИП к току, напряжению, сопротивлению и т. п., если эти величины являются входными для рассматриваемого ИП.

Чувствительность ИП зависит от вида его функции преобразования: если последняя линейна, то чувствительность ИП постоянна и не зависит от значения x , в этом случае $S = S_{cp}$, если же функция преобразования ИП нелинейна, то его чувствительность зависит от x и $S \neq S_{cp}$. Например, для ИП с характеристикой вида $y = ax + b$ имеем $S = a$; для ИП с характеристикой вида $y = ax^2$ имеем $S = 2ax$.

Под порогом чувствительности ИП понимается такое минимальное приращение входной величины, которое вызывает уверенно различимое приращение выходной величины ИП. Дело в том, что смещение нулевого уровня, собственные шумы ИП, гистерезисные явления в характеристике ограничивают минимальное значение входного сигнала, который может быть преобразован данным ИП. Поэтому порог реагирования ИП всегда имеет конечное значение и выражается обычно в единицах входной величины. Например, усилитель постоянного напряжения с коэффициентом усиления K имеет чувствительность

$$S = dU_{вых} / dU_{вх} = K.$$

Этот параметр показывает, во сколько раз будет усилено поданное на вход усилителя напряжение, но не дает ответа на вопрос о том, какое минимальное напряжение, поданное на вход усилителя, может быть надежно обнаружено на его выходе. До-

пустим, что этот усилитель в рабочем диапазоне влияющих величин характеризуется нестабильностью нулевого уровня (его начальное смещение, дрейф и шумы), значение которой, приведенное ко входу, не превышает границ ± 5 мВ. Тогда можно сделать вывод, что порог реагирования данного усилителя равен ± 5 мВ независимо от значения его чувствительности (коэффициента усиления).

Входное и выходное сопротивления измерительного преобразователя. Любой ИП должен преобразовывать входной сигнал с минимальными искажениями. Степень искажения сигнала в ИП в большой мере зависит от его входного и выходного сопротивлений. Покажем это на следующем примере. Пусть ИП с входным сопротивлением $R_{\text{вх}}$ подключается к активному двухполюснику с выходным сопротивлением R и ЭДС \mathcal{E} (рис. 6.6, а). До замыкания ключа напряжение на выходе активного двухполюсника равно \mathcal{E} , после замыкания ключа это напряжение уменьшится до значения

$$u = \mathcal{E} \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R}.$$

Снижение выходного напряжения произошло потому, что в цепи возник ток, который на сопротивлении R создал падение напряжения. Именно на это значение относительно ЭДС и уменьшится выходное напряжение активного двухполюсника, причем снижение выходного напряжения будет тем больше, чем меньше значение $R_{\text{вх}}$. Следовательно, для того чтобы искажение (уменьшение) выходного напряжения активного двухполюсника при подключении ИП было минимальным, необходимо потребовать выполнения условия $R_{\text{вх}} \gg R$.

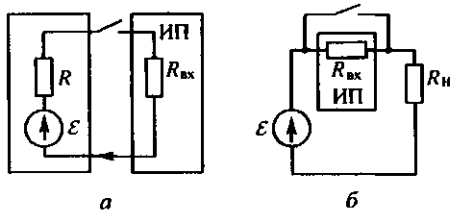


Рис. 6.6. К вопросу о влиянии мощности, потребляемой ИП, на результат преобразования: а — преобразуемый сигнал — напряжение; б — преобразуемый сигнал — ток

Другой пример. На рис. 6.6, б показана схема, содержащая источник ЭДС и последовательно включенное сопротивление нагрузки $R_{\text{н}}$. Допустим, что ключ замкнут, тогда ток в цепи равен $i_1 = \mathcal{E}/R_{\text{н}}$. Введем в схему последовательно с $R_{\text{н}}$ ИП с входным сопротивлением R (разомкнем ключ). Ток в цепи уменьшится и будет равен:

$$i_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_{\text{н}} + R_{\text{вх}}}.$$

Очевидно, что новое значение тока в цепи будет мало отличаться от прежнего значения, если выполняется условие $R_{\text{вх}} \ll R_{\text{н}}$.

Таким образом, приходим к выводу, что минимизация искажения входного сигнала в первом случае (рис. 6.6, а) требует ИП с возможно большим $R_{\text{вх}}$, во втором случае (рис. 6.6, б) — с возможно малым $R_{\text{вх}}$. Общим требованием к ИП в обоих случаях является минимизация мощности, потребляемой входной цепью. В самом деле, при $R_{\text{вх}} \rightarrow 0$ в схеме на рис. 6.6, а замыкание или размыкание ключа не изменяет выходное напряжение двухполюсника, в схеме на рис. 6.6, б при $R_{\text{вх}} \rightarrow 0$ замыкание или размыкание ключа не изменяет тока нагрузки.

Быстродействие измерительного преобразователя. Каждый ИП обладает определенной инерционностью: большей или меньшей — это зависит от принципа действия и конструкции ИП. Инерционность ИП не позволяет мгновенно получить на выходе отклик на появление или изменение сигнала на входе и ограничивает его возможность преобразования быстроизменяющихся сигналов. Быстродействие ИП определяется тем временем, которое необходимо для появления на выходе ИП результата преобразования, соответствующего сигналу на входе.

6.3. Измерительная цепь как преобразователь

Во многих измерительных устройствах измерительную цепь (ИЦ) можно рассматривать как последовательное включение ряда ИП.

Измерительная цепь с двумя последовательно включенными ИП представлена на рис. 6.7. Допустим, что это линейные ИП с коэффициентами передач K_1 и K_2 соответственно. Обозначим че-



Рис. 6.7. Измерительная цепь с двумя ИП

рез x и z соответственно входную и выходную величины цепи, y — выходная величина первого ИП, она же является входной величиной для второго ИП. Рассмотрим функцию ИП, чувствительность и погрешность данной цепи.

Функция преобразования устанавливает связь между z и x . В данном случае оба ИП линейны и характеризуются коэффициентами передачи, следовательно, и вся цепь будет характеризоваться коэффициентом передачи K . Найдем зависимость K от K_1 и K_2 :

$$K = \frac{z}{x} = \frac{z}{y} \cdot \frac{y}{x} = K_1 K_2.$$

Следовательно, коэффициент передачи ИЦ, состоящей из последовательно включенных ИП, равен произведению коэффициентов передач отдельных ИП. Этот вывод остается справедливым при любом числе ИП в ИЦ. Если число ИП в ИЦ равно n , то

$$K = K_1 K_2 \dots K_n.$$

Если отдельные ИП в ИЦ характеризуются передаточными функциями, то и передаточная функция ИЦ, состоящая из последовательно включенных ИП, равна произведению передаточных функций всех ИП данной ИЦ.

Рассмотрим зависимость чувствительности ИЦ от чувствительности отдельных ИП:

$$S = \frac{dz}{dx} \frac{dy}{dy} = \frac{dy}{dx} \frac{dz}{dy} = S_1 S_2,$$

где S — чувствительность всей ИЦ; S_1 , S_2 — чувствительность первого и второго ИП соответственно.

Если число ИП равно n , то аналогичным приемом можно показать, что

$$S = S_1 S_2 \dots S_n, \quad (6.4)$$

т. е. чувствительность ИЦ, состоящей из ряда последовательно включенных ИП, равна произведению чувствительностей всех ИП, входящих в данную цепь.

Погрешность ИЦ зависит также от погрешностей отдельных ИП цепи. Определим эту зависимость.

Предварительно заметим, что при определении погрешности ИЦ поступают так: погрешности каждого ИП делят на аддитивные и мультипликативные, в каждой из них выделяют систематические и случайные составляющие и затем суммируют отдельно систематические и случайные составляющие; в результате получают систематическую и случайную составляющие аддитивной и мультипликативной погрешностей ИЦ; результирующую погрешность ИЦ определяют как сумму полученных составляющих погрешности. Рассмотрим этот метод анализа погрешностей на примере ИЦ, содержащей два последовательно включенных ИП (рис. 6.8), на входах которых действуют источники помех, аддитивных к входному сигналу E_1 и E_2 соответственно (это могут быть смещения нулевых уровней, шумы, наводки, термо-ЭДС и т. п.). Аддитивные помехи каждого ИП обычно приводят ко входу ИЦ. Для рассматриваемой ИЦ приведенная ко входу суммарная аддитивная помеха E равна:

$$E = E_1 + E_2 / K_1.$$

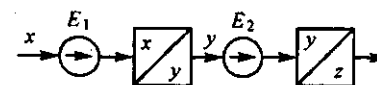


Рис. 6.8. Измерительная цепь с источником аддитивной погрешности

Если ИЦ содержит n ИП, то

$$E = E_1 + \frac{E_2}{K_1} + \frac{E_3}{K_1 K_2} + \dots + \frac{E_n}{K_1 K_2 \dots K_{n-1}}.$$

Абсолютная аддитивная погрешность ИЦ

$$\Delta_a = x + E - x = E,$$

а ее относительное значение

$$\delta_a = \frac{\Delta_a}{x} = \frac{E_1}{x} + \frac{E_2}{K_1 x} = \delta_{a1} + \delta_{a2},$$

где $\delta_{a1} = E_1/x$ — относительная аддитивная погрешность первого ИП; $\delta_{a2} = E_2/K_1 x$ — относительная аддитивная погрешность второго ИП, так как $K_1 x$ — это полезный сигнал на входе второго ИП.

Если ИЦ содержит n преобразователей, ее суммарная относительная аддитивная погрешность

$$\delta_a = \delta_{a1} + \delta_{a2} + \dots + \delta_{an} = \sum_{j=1}^n \delta_{aj}. \quad (6.5)$$

При суммировании погрешностей их разделяют на систематические и случайные составляющие. Систематические составляющие $\delta_{a,систj}$ суммируются алгебраически (с учетом знака погрешности каждого ИП):

$$\delta_{a,сист} = \sum_{j=1}^n \delta_{a,систj}.$$

Если знаки суммируемых погрешностей неизвестны, то их обычно складывают арифметически, однако при большом числе ИП (более трех) такой прием дает сильно завышенное значение результирующей погрешности.

Случайные составляющие $\delta_{a,слj}$ суммируются в соответствии с правилами суммирования случайных величин.

$$\delta_{a,сл} = \sqrt{\delta_{a,сл1}^2 + \delta_{a,сл2}^2 + \dots + \delta_{a,слn}^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^n \delta_{a,слj}^2}.$$

6.4. Методы коррекции погрешностей

Под коррекцией понимается выявление погрешностей и внесение соответствующих поправок для повышения точности ПЭ, ИП и ИЦ в целом. Коррекция заключается в том, что на вход ИП подается тестовый сигнал определенного вида и интенсивности и по реакции ИП на этот сигнал судят о значении его погрешности, а затем принимается решение о введении поправки путем регулировки одного из параметров ИП. Указанные действия могут выполняться оператором вручную или автоматически с помощью специальных цепей. В последнем случае метод коррекции называют автоматическим, а цепи, введенные в схему ИП для коррекции, — цепями коррекции.

На практике наиболее часто встречаются с задачей коррекции аддитивной и мультипликативной составляющих систематической погрешности ИП. Коррекция аддитивной составляющей

погрешности ИП осуществляется следующим образом. Вход ИП отключается от источника входного сигнала и замыкается накоротко или на резистор с определенным сопротивлением. Это соответствует подаче на вход ИП тестового сигнала нулевого уровня. Если в ИП имеется источник аддитивной погрешности, то выходной сигнал ИП отклонится от нулевого уровня. При ручной коррекции на второй вход ИП подается корректирующий сигнал, приводящий выходной сигнал ИП к нулевому уровню. При автоматической коррекции выходной сигнал ИП запоминается на специальном запоминающем элементе и в дальнейшем используется в качестве корректирующего.

На рис. 6.9, *a*, *б* показано выполнение коррекции напряжения смещения $U_{см}$ в измерительном усилителе постоянного тока. Во время коррекции переключатель SA переводится в позицию 2, что равносильно подаче на вход усилителя тестового сигнала нулевого уровня. Под действием $U_{см}$ выходное напряжение усилителя отклоняется от нулевого уровня. При ручной коррекции для обнаружения этого отклонения в схему введен вольтметр. Регулировкой резистора R на второй вход усилителя подается корректирующее напряжение U_k с таким значением, чтобы привести выходной сигнал усилителя к нулевому уровню. Затем переключатель SA переводится в позицию 1 и на усилитель подается входной сигнал. Однако $U_{см}$ не остается постоянным во времени и продолжает медленно изменяться, поэтому коррекцию надо проводить периодически, и тем чаще, чем меньше допускается разность $U_{см} - U_k$ в процессе измерения.

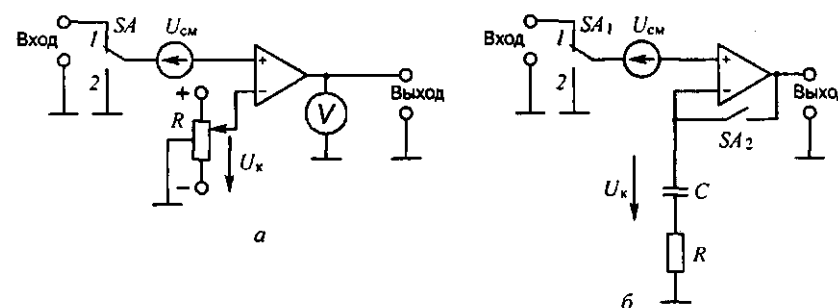


Рис. 6.9. Схемы коррекции аддитивной погрешности измерительного усилителя постоянного тока: *a* — при ручной коррекции; *б* — при автоматической коррекции

Примером организации ручной коррекции аддитивной погрешности могут служить ИП современных вольтметров.

В показывающих приборах различных систем, кроме электронной, для коррекции используется специальный регулятор, поводок которого в виде головки винта выведен на корпус измерительного механизма. Причина аддитивных погрешностей — изменение упругих свойств спиральных пружин или растяжек, создающих противодействующий момент. Последние отличаются высокой стабильностью, и пользоваться корректором приходится очень редко. Поэтому винт корректора делают «утопленным» и его поворот при коррекции производится отверткой. В электронных вольтметрах основным источником аддитивных погрешностей является усилитель постоянного тока или диодный детектор, здесь коррекцией приходится пользоваться чаще, примерно 1 раз в час. Схема коррекции выглядит так, как показано на рис. 6.9, а, но управление резистором R вынесено на лицевую панель прибора и снабжено удобной ручкой. В цифровых вольтметрах постоянного тока применяется автоматическая коррекция.

Осуществление автоматической коррекции аддитивной погрешности измерительного усилителя постоянного тока показано на рис. 6.9, б. В режиме коррекции переключатель SA_1 переводится в позицию 2, а ключ SA_2 замыкается, при этом на конденсаторе C выделяется напряжение U_k , примерно равное $U_{см}$. При переходе к режиму измерения ключ SA_2 размыкается, переключатель SA_1 переводится в позицию 1 и на усилитель подается входной сигнал. Напряжение U_k на конденсаторе C корректирует $U_{см}$. Резистор R необходим для снижения уровня высокочастотных шумов усилителя и обеспечения устойчивости его работы.

Коррекция мультипликативной составляющей систематической погрешности ИП необходима в тех случаях, когда стабильность коэффициентов преобразования отдельных ПЭ недостаточна. Осуществляется коррекция следующим образом. На вход ИП подается тестовый сигнал, значение которого выбирается близким к номинальному значению входного сигнала, а выходной сигнал ИП измеряется. Коэффициент преобразования ИП регулируется так, чтобы значение выходного сигнала равнялось произведению входного тестового сигнала на номинальный коэффициент преобразования ИП.

На рис. 6.10 показана схема коррекции мультипликативной погрешности измерительного усилителя постоянного тока. Для

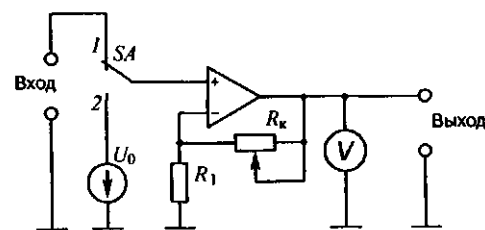


Рис. 6.10. Схема мультипликативной коррекции погрешности измерительного усилителя

коррекции в схему введены источник опорного напряжения U_0 (тестовый сигнал), переключатель SA и вольтметр V . В режиме коррекции переключатель переводится в позицию 2 и регулировкой сопротивления резистора R_x изменяют коэффициент усиления K усилителя так, чтобы выходное напряжение усилителя приняло требуемое значение $U_{вых}$, при этом

$$K = K_{ном} = U_{вых} / U_0.$$

Коррекция мультипликативных погрешностей обычно производится гораздо реже, чем аддитивных, поскольку стабильность коэффициентов передач отдельных ПЭ, как правило, высокая. Поэтому только ИП высокой точности (например, аналого-цифровые ИП и т. п.) содержат элементы регулировки мультипликативной погрешности, которыми пользуются в процессе эксплуатации ИП. Например, в современных цифровых вольтметрах предусматривается возможность калибровки и коррекции мультипликативной погрешности прибора по встроенному или внешнему нормальному элементу.

6.5. Мостовые цепи

Мостовые цепи (мосты) применяются для измерений параметров электрических цепей, для преобразования параметров цепей в электрические сигналы, в качестве фильтров и т. д. Мостовые цепи делятся на четырехплечие и многоплечие. На рис. 6.11 показана простейшая мостовая цепь — четырехплечий мост. Мост содержит четыре комплексных сопротивления Z_1, Z_2, Z_3, Z_4 . Точки a, b, c, d — вершины моста, цепи между двумя смежными вершинами — плечи моста, а между двумя противо-

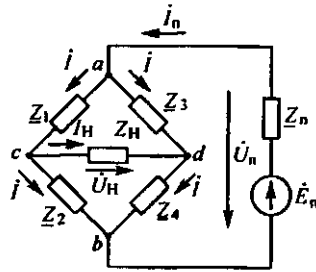


Рис. 6.11. Схема четырехплечего моста

положными вершинами ab или cd — диагонали моста. В одну из диагоналей включается источник питания моста (диагональ ab), эту диагональ называют диагональю питания. Другая диагональ содержит нагрузку с сопротивлением Z_H , ее называют диагональю нагрузки, выходной или указательной диагональю. В измерительных мостах в эту диагональ включается сравнивающее устройство (СУ). В качестве СУ обычно используются гальванометры. Источник питания моста на рис. 6.12 показан в виде активного двухполюсника с ЭДС \dot{E}_n и внутренним сопротивлением Z_n . Напряжение \dot{U}_n , действующее на вершинах моста в диагонали питания, называют напряжением питания моста. Если $Z_n = 0$, то $\dot{U}_n = \dot{E}_n$. Ток и напряжение в диагонали нагрузки обозначены соответственно \dot{I}_H и \dot{U}_H .

Как видно из рис. 6.11, диагональ нагрузки напоминает мостик, переброшенный между ветвями с сопротивлениями Z_1 , Z_2 и Z_3 , Z_4 , отсюда возникло и название — мостовые цепи.

В зависимости от вида напряжения, питающего мостовую цепь, различают мосты постоянного и переменного тока. Мосты постоянного тока применяются для измерения сопротивления электрической цепи постоянному току, а также для преобразования сопротивления в ток или напряжение. Мосты переменного тока применяются для измерения или преобразования комплексных сопротивлений в электрический сигнал, а также в качестве фильтров.

Мостовые цепи обладают одним важным свойством — при определенном соотношении сопротивлений плечей моста напряжение и ток в диагонали нагрузки полностью отсутствуют при любых значениях \dot{E}_n . Такое состояние моста называют состояни-

ем равновесия, а соотношение сопротивлений плечей моста, при котором мост уравновешен, — условием равновесия моста.

Если в условие равновесия моста входит частота питающего мост напряжения, то такой мост называют частотно-зависимым, в противном случае — частотно-независимым. Частотно-зависимые мосты применяются в качестве фильтров и для измерения частоты питающего мост напряжения, частотно-независимые — для измерения параметров электрической цепи или их преобразования в ток и напряжение.

В процессе измерения мостовая цепь может приводиться к состоянию равновесия путем регулировки сопротивлений в плечах моста, такие цепи называют уравновешенными, в противном случае — неуравновешенными. В мостах постоянного тока измеряемая величина представляет собой сопротивление электрической цепи постоянному току и выражается действительным числом. Для уравновешивания такой цепи требуется только один регулируемый элемент. В мостах переменного тока измеряемая величина выражается комплексным числом, в этом случае требуются два уравновешивающих элемента — соответственно для активной и реактивной составляющих измеряемого сопротивления. Существуют мостовые цепи, которые уравновешиваются только по одной из этих составляющих. Такие цепи называют полууравновешенными или квазиуравновешенными.

Выразим условие равновесия четырехплечего моста через его параметры. Допустим, что мост (рис. 6.11) уравновешен, т. е. $\dot{I}_H = 0$, $\dot{U}_H = 0$ при $\dot{U}_n \neq 0$. Это возможно только в случае равенства потенциалов точек c и d . Следовательно, падения напряжения на первом и третьем, а также втором и четвертом плечах моста одинаковы:

$$\dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_3 Z_3;$$

$$\dot{I}_2 Z_2 = \dot{I}_4 Z_4.$$

Кроме того, $\dot{I}_H = 0$, следовательно, $\dot{I}_1 = \dot{I}_2$, $\dot{I}_3 = \dot{I}_4$. Разделив почленно записанные выше равенства, получим условие равновесия четырехплечего моста

$$Z_1/Z_2 = Z_3/Z_4$$

или

$$Z_1 Z_4 = Z_2 Z_3. \quad (6.6)$$

Таким образом, если известны значения сопротивлений любых трех плечей уравновешенного моста, то из условия равновесия всегда можно определить значение сопротивления четвертого плеча. В дальнейшем будем полагать, что измеряемое сопротивление всегда включено в первое плечо моста и при $Z_1 = Z_x$ мост уравновешен.

В мостах постоянного тока уравнение (6.6) связывает действительные величины:

$$R_x = R_3 \frac{R_2}{R_4}.$$

Обычно такой мост приводится к равновесию путем регулировки сопротивления R_3 . Отношение сопротивлений R_2/R_4 в уравнении равновесия называется масштабным множителем, его значение выбирается равным 10^n , где n — целое положительное или отрицательное число (возможно $n = 0$). В этом случае третье плечо моста называют плечом уравновешивания, а второе и четвертое — плечами отношения. С помощью плеч отношения выбирается диапазон измерения моста.

В мостах переменного тока уравнение (6.6) связывает комплексные величины:

$$\frac{z_x e^{j\varphi_x}}{z_2 e^{j\varphi_2}} = \frac{z_3 e^{j\varphi_3}}{z_4 e^{j\varphi_4}}.$$

Отсюда искомые величины:

$$z_x e^{j\varphi_x} = z_3 \frac{z_2}{z_4} e^{j(\varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_4)}.$$

Два комплексных числа равны только тогда, когда равны их модули и аргументы или действительные и мнимые части. В соответствии с этим положением каждое из полученных уравнений распадается на два равенства:

$$z_x = z_3 \frac{z_2}{z_4}; \quad \varphi_x = \varphi_2 + \varphi_3 - \varphi_4. \quad (6.7)$$

Из (6.7) видно, что уравновешивание мостов переменного тока требует регулировки как минимум двух величин — модуля и

фазового угла или действительной и мнимой составляющих уравновешивающего сопротивления.

На практике широкое применение получили мосты, у которых два плеча содержат только активные сопротивления, а два других — реактивные. Для таких мостов на основании (6.7) можно утверждать:

- если активные сопротивления находятся в смежных плечах, например R_3 и R_4 (рис. 6.12, а и б), и $\varphi_3 = \varphi_4 = 0$, то два других плеча должны содержать либо индуктивное, либо емкостное сопротивление, чтобы выполнялось равенство $\varphi_x = \varphi_2$;
- если активные сопротивления расположены в противоположных плечах, например $\varphi_2 = \varphi_3 = 0$ (рис. 6.12, в), то другие плечи должны содержать: одно — индуктивную, другое — емкостную компоненту, чтобы имело место равенство $\varphi_x = -\varphi_4$.

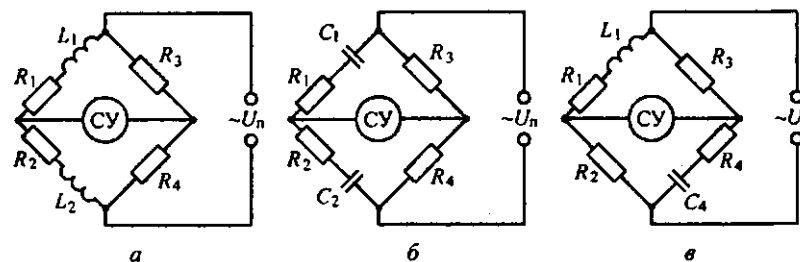


Рис. 6.12. Схемы мостов переменного тока: а — включение катушек индуктивности в смежные плечи; б — включение конденсаторов в смежные плечи; в — включение катушек индуктивности и конденсатора в противоположные плечи

Уравновешивается мост попеременной регулировкой двух его параметров, в качестве которых обычно выбирают регулируемые резисторы, так как они проще в изготовлении и стоят дешевле конденсаторов с регулируемой емкостью и магазинов индуктивностей. Например, в схеме рис. 6.12, а это могут быть резисторы R_2 и R_3 . Уравнение равновесия такого моста имеет вид:

$$R_x + j\omega L_x = \frac{R_3}{R_4} R_2 + j\omega \frac{R_3}{R_4} L_2.$$

Первоначально регулировкой R_2 добиваются равенства действительных частей уравнения, затем регулировкой R_3 — мнимых. Однако R_3 входит и в выражение для действительной части,

его регулировка в процессе выравнивания мнимых составляющих в уравнении равновесия моста нарушает первоначальное условие $R_x = R_2 R_3 / R_4$. Поэтому в процессе уравнивания приходится выполнять ряд регулировок сопротивлений R_2 и R_3 , чтобы привести мост в состояние равновесия. Свойство моста, определяющее число необходимых регулировок для его уравнивания, называют сходимостью моста. Если мост обладает хорошей сходимостью, то он быстро приводится к равновесию. Сходимость зависит от выбора регулируемых параметров и соотношения между активными и реактивными параметрами схемы.

6.6. Компенсационные цепи

Компенсационные цепи предназначены для сравнения двух независимых напряжений или токов нулевым методом (методом компенсации). Компенсационные цепи для сравнения токов имеют относительно узкую и специальную область применения, поэтому они далее не рассматриваются.

Простейшая схема компенсационной цепи с компенсацией напряжений показана на рис. 6.13. Если ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 параметры схемы связаны соотношением

$$\dot{E}_1 = \dot{E}_2 \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2},$$

то напряжение и ток в цепи сравнивающего устройства отсутствуют, т. е. схема уравновешена, а записанное уравнение является условием равновесия. Это условие отличается от условия равновесия мостовой цепи тем, что в него помимо параметров цепи входят и действующие в ней ЭДС. Если известны значения \dot{E}_2 , Z_1 и Z_2 , то из условия равновесия можно найти значение \dot{E}_1 , при

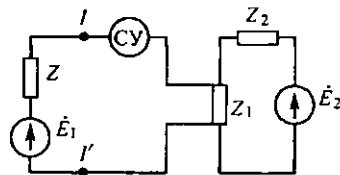


Рис. 6.13. Схема компенсационной цепи

этом важно подчеркнуть, что в уравновешенной схеме ток в цепи СУ отсутствует, следовательно, на выводах $I = I'$ будет действовать ЭДС \dot{E}_1 независимо от значения сопротивления Z . Компенсационные цепи лежат в основе устройства современных цифровых вольтметров и компенсаторов.

Компенсаторы, иногда их называют потенциометрами, — это приборы для измерения напряжения и связанных с ним величин, действие которых основано на компенсационном методе измерения. В зависимости от вида измеряемого напряжения различают компенсаторы постоянного и переменного тока.

Компенсаторы постоянного тока применяются для точных измерений ЭДС, напряжений и других величин, которые могут быть преобразованы в напряжение постоянного тока, а также для проверок показывающих приборов — амперметров, вольтметров, ваттметров. Упрощенная схема компенсатора постоянного тока показана на рис. 6.14. Под действием ЭДС источника питания E в схеме компенсатора возникает рабочий ток I_p . Этот ток, протекая через сопротивление R , создает на нем компенсирующее напряжение U_k , которое посредством *сравнивающего устройства* СУ (переключатель SA_4 находится в позиции X) сравнивается с измеряемым напряжением U_x . Регулировкой U_k добиваются состояния равновесия в схеме, т. е. выполнения условия $U_x = U_k$. О значении U_x судят по известному значению U_k . Точность измерения U_x полностью определяется точностью значения U_k и точностью его сравнения с U_x . В свою очередь, точность U_k зависит от точности установки рабочего тока и точности изготовления регулируемого резистора R . Последний в современных компенсаторах выполняется в виде многодекадного магазина сопротивлений высокой точности.

Рабочий ток устанавливается регулировкой сопротивления резистора R_p так, чтобы выполнялось равенство

$$I_p R_0 = E_{нэ},$$

где $E_{нэ}$ — ЭДС нормального элемента. Это равенство устанавливается по отсутствию тока в СУ, переключатель которого SA_4 во время установки рабочего тока переводится в позицию НЭ. Поскольку ЭДС нормального элемента и значение R_0 известны с высокой точностью, то и значение $I_p = E_{нэ} / R_0$ известно с высокой точностью. Часть резистора R_0 на рис. 6.14 показана регули-

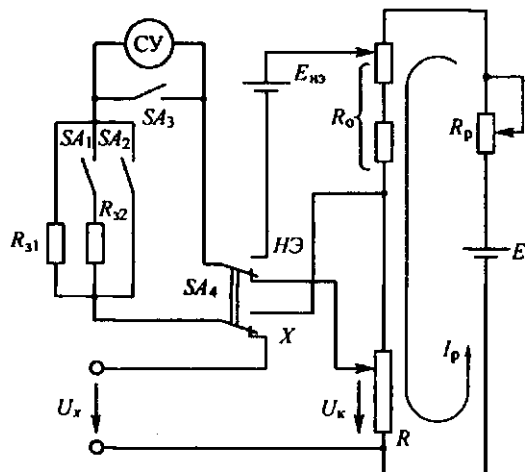


Рис. 6.14. Упрощенная схема компенсатора постоянного тока

руемой. Дело в том, что ЭДС $E_{нз}$ зависит от окружающей температуры. Указанная зависимость не очень сильная, но она есть, и надо позаботиться о том, чтобы колебания окружающей температуры не влияли на точность установки I_p . Это условие достигается регулировкой R_0 . Допустим, что в результате отклонения окружающей температуры от нормального значения ЭДС $E_{нз}$ увеличилась на 0,02 %, тогда, увеличив и R_0 на 0,02 %, получим неизменное значение тока I_p . Установленное значение I_p должно оставаться неизменным в течение времени, необходимого для измерения U_x , следовательно, источник этого тока (ЭДС E) должен отличаться высокой стабильностью напряжения во времени. В точных компенсаторах источником ЭДС E служат высокостабильные источники напряжения, в компенсаторах средних и низких классов точности — сухие батареи.

В качестве СУ обычно используются гальванометры. Защита гальванометра от перегрузок как правило производится с помощью двух резисторов, R_{31} и R_{32} (рис. 6.14). Резистор $R_{31} \approx 20$ МОм включен постоянно и применяется при грубом уравнивании U_x с помощью старших декад резистора R . В компенсаторах невысокой точности R_{31} обычно отсутствует. Кнопкой SA_1 подключается резистор R_{32} , сопротивление которого выбирается равным 50 или 450 кОм, и производится уравнивание U_x регулировкой средних декад резистора R . При переходе к точному

уравниванию их младшими декадами резистора R замыкается кнопка SA_2 и гальванометр включается в цепь непосредственно, реагируя на малейшее отклонение разности $U_x - U_k$ от нуля. После тщательного уравнивания схемы обе кнопки SA_1 и SA_2 размыкаются, затем считывается результат измерения. Нормальное положение кнопок SA_1 , а SA_2 — разомкнутое, при этом гальванометр защищен от возможных случайных перегрузок. Кнопка SA_3 предназначена для успокоения подвижной части гальванометра, если в его цепи прошел большой импульс тока, и подвижная часть находится в колебательном режиме.

Компенсаторы выпускаются следующих классов точности: 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005; 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5. Верхний предел измеряемого напряжения 1...2,5 В.

При измерении больших напряжений применяют делители напряжения (рис. 6.15); с их помощью расширяют пределы измерения компенсатора до 1000 В. Делители напряжения обычно имеют коэффициенты деления 1 : 10; 1 : 100; 1 : 1000 при полном сопротивлении делителя до 10 МОм. Однако при этом теряется важное достоинство компенсационного метода — отсутствие тока, отбираемого от источника U_x , при уравнивании входного и компенсирующего напряжений. Как видно из рис. 6.15, независимо от равновесия в схеме ток от источника U_x всегда будет протекать через делитель напряжения.

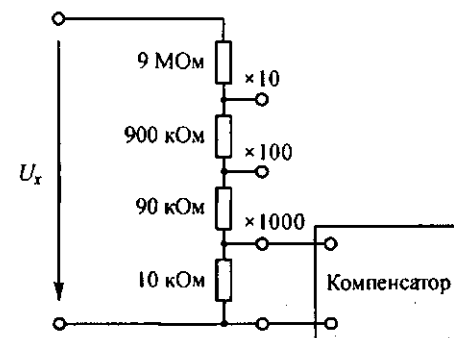


Рис. 6.15. Схема делителя напряжения, подключенного к компенсатору

При измерении тока он пропускается через образцовый резистор R_0 , и измеряется напряжение на зажимах U_0 (рис. 6.16). Значение искомого тока находят из выражения $I_x = U_0 / R_0$.

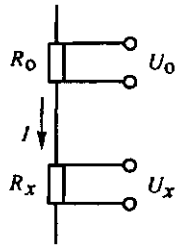


Рис. 6.16. Схема для измерения электрического сопротивления компенсатором

При измерении сопротивления R_x последнее включается последовательно с образцовым резистором R_0 , значение сопротивления которого одного порядка с R_x . По цепи пропускается стабильный ток I , и компенсатором измеряют значения U_0 и U_x .

Так как $U_x = IR_x$, $U_0 = IR_0$, то

$$R_x = \frac{R_0}{U_0} U_x.$$

К источнику тока I (рис. 6.16) предъявляется требование высокой стабильности во времени, поскольку значения U_0 и U_x измеряются последовательно по времени и важно, чтобы ток при этом не менялся.

Контрольные вопросы

1. Какие преобразователи называются функциональными?
2. Что называется чувствительностью измерительного преобразователя?
3. От чего зависит порог чувствительности измерительного преобразователя?
4. Для чего применяется коррекция измерительных преобразователей?
5. Чему равен ток в диагонали нагрузки моста в состоянии равновесия?
6. Какое главное преимущество компенсатора теряется при подключении ко входу делителя напряжения?

Глава 7

ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

7.1. Электронные аналоговые вольтметры

В электронных вольтметрах конструктивно объединены электронный преобразователь и измерительный механизм. Электронный преобразователь может быть ламповым или полупроводниковым. Измерительный механизм обычно магнитоэлектрический. Электронные аналоговые вольтметры позволяют производить измерения в широком диапазоне напряжений и частот.

Электронные вольтметры постоянного тока выполняются по схеме, представленной на рис. 7.1.

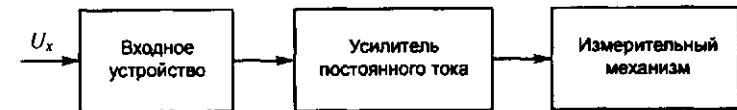


Рис. 7.1

Измеряемое напряжение U_x подается на входное устройство, представляющее собой многопредельный высокоомный делитель на резисторах. С делителя напряжение поступает на усилитель постоянного тока и далее — на измерительный механизм. Делитель и усилитель постоянного тока ослабляют или усиливают напряжение до значений, необходимых для нормальной работы измерительного механизма. Одновременно усилитель обеспечивает согласование высокого сопротивления входной цепи прибора с низким сопротивлением катушки измерительного механизма. Входное сопротивление электронного вольтметра составляет обычно несколько десятков мегаом. Это позволяет производить

измерения в высокоомных цепях без заметного потребления мощности от объекта измерения. Диапазон измеряемых напряжений постоянного тока — от десятков милливольт до нескольких киловольт. Для измерения малых напряжений используют микровольтметры с преобразованием постоянного тока в переменный. В таких приборах усиление измеряемого сигнала производится на переменном токе, что позволяет достичь больших значений коэффициента усиления и снизить порог чувствительности до нескольких микровольт. Рабочий диапазон электронных микровольтметров постоянного тока лежит в пределах $10^{-8} \dots 1$ В.

Электронные вольтметры переменного тока выполняются по двум структурным схемам, представленным на рис. 7.2.

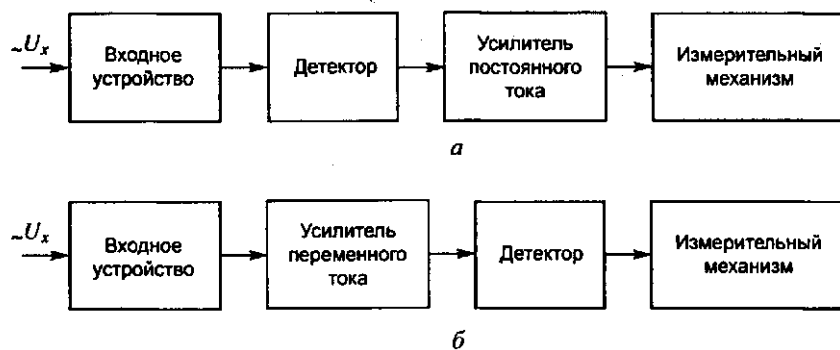


Рис. 7.2

В первой из этих схем измеряемое переменное напряжение сначала преобразуется в постоянное при помощи детектора, а затем усиливается усилителем постоянного тока и воздействует на измерительный механизм. Во второй схеме усиление производится на переменном токе (для этого служит усилитель переменного тока) и лишь затем предварительно усиленный сигнал выпрямляется детектором и отклоняет стрелку измерительного механизма. Эти схемы дополняют друг друга. Каждая из них обладает своими преимуществами и недостатками. По первой схеме могут строиться вольтметры, обладающие широким частотным диапазоном (10 Гц ... 1000 МГц), но обычно не способные измерять напряжения меньше нескольких десятых долей вольта: детектор выпрямляет только достаточно большие напряжения.

Вторая схема позволяет строить чувствительные вольтметры, нижний предел измерения которых составляет всего лишь единицы микровольт. Однако эти приборы имеют меньший частотный диапазон, поскольку частотный диапазон усилителя переменного тока трудно сделать достаточно большим.

Детекторы, применяемые в электронных вольтметрах, служат для выпрямления переменного тока. Они могут быть выполнены по различным схемам и подразделяются на детекторы средневывпрямленного, амплитудного и среднеквадратического значений. Это деление показывает, какому из значений (средневывпрямленному, амплитудному или среднеквадратическому) измеряемого напряжения соответствует напряжение на выходе детектора.

По отношению к постоянной составляющей напряжения различают детекторы с открытым и закрытым входом. В первом случае постоянная составляющая наряду с переменной вносит свой вклад в результат измерения, во втором — постоянная составляющая исключается из-за наличия разделительного конденсатора на входе детектора.

Одна из возможных схем усилителя постоянного тока (в упрощенном виде) представлена на рис. 7.3.

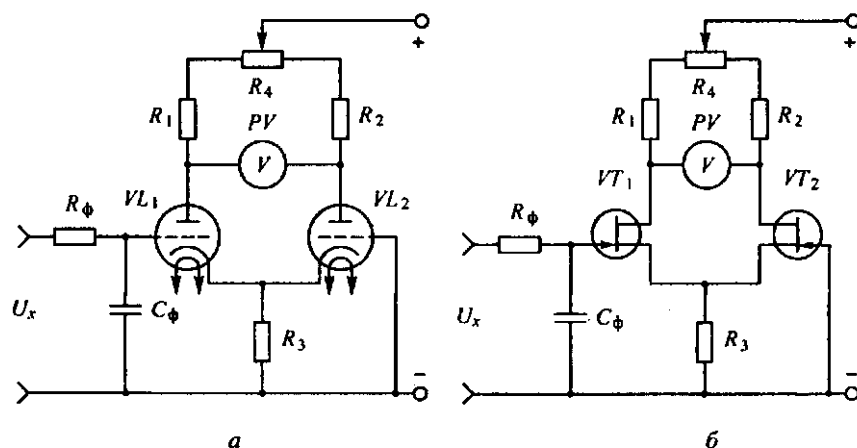


Рис. 7.3. Усилитель постоянного тока на электронных лампах

Измеряемое напряжение U_x подается на сетку триода VL_1 через резистор R_ϕ , который вместе с конденсатором C_ϕ образует фильтр, уменьшающий пульсации на сетке лампы. При коротко-

замкнутым входе, т. е. в отсутствие напряжения U_x , потенциалы сеток обеих ламп VL_1 и VL_2 равны и установка на нуль измерительного механизма вольтметра PV может быть выполнена при помощи переменного резистора R_4 . Появление напряжения U_x приведет к изменению внутреннего сопротивления лампы VL_1 , из-за чего нарушится баланс схемы, потенциалы анодов не будут равны и через цепь измерительного механизма потечет ток. Направление и значение этого тока зависят от знака и значения измеряемого напряжения U_x . Таким образом, шкала измерительного механизма может быть проградуирована в вольтах постоянного тока.

К усилителю постоянного тока милливольтметра предъявляются определенные требования: он должен обладать незначительным дрейфом нуля, большим входным сопротивлением и стабильным коэффициентом усиления (рис. 7.4). Для уменьшения дрейфа нуля УПТ выполнен по балансной схеме, и в нем применены так называемые композитные транзисторы, включающие полевой транзистор $VT1$ ($VT4$) и биполярный транзистор $VT2$ ($VT3$). Использование полевых транзисторов позволило по-

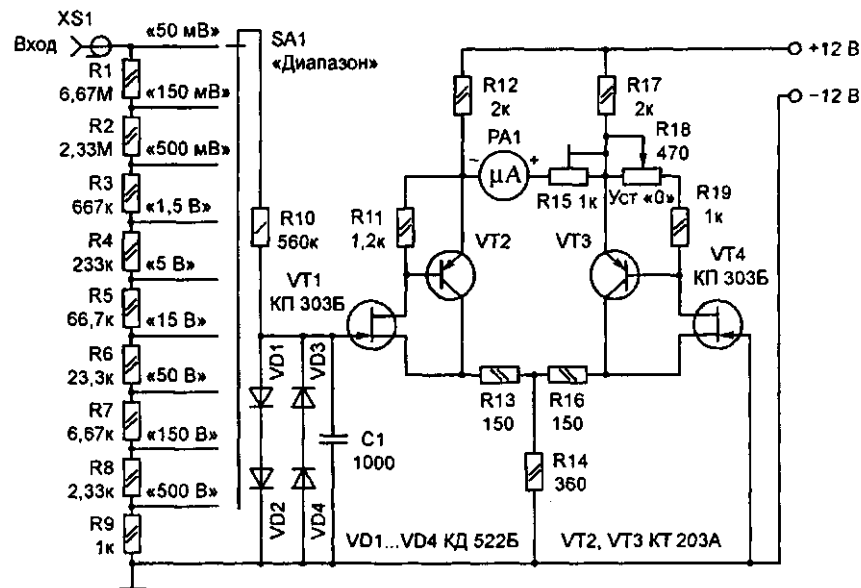


Рис. 7.4. Вольтметр на транзисторном усилителе постоянного тока

лучить большое входное сопротивление УПТ, а биполярных — большую крутизну вольт-амперной характеристики композитного транзистора, что повысило чувствительность прибора. Резисторы $R11$, $R18$, $R19$ обеспечивают необходимый режим работы композитных транзисторов. Для повышения стабильности коэффициента усиления УПТ и его линейности дополнительно введены резисторы $R13$ и $R16$. Нагрузками композитных транзисторов являются резисторы $R12$ и $R17$, между которыми включен стрелочный индикатор $PA1$ с подстроечным резистором $R15$, предназначенным для калибровки усилителя. Балансируют УПТ переменным резистором $R18$ «Уст. «0»».

При указанных на схеме номиналах резисторов стрелка индикатора отклоняется до конечного деления шкалы (100 мкА) при подаче на вход УПТ напряжения 50 мВ.

Для защиты полевого транзистора $VT1$ от возможных перегрузок по напряжению установлены цепочки диодов $VD1$, $VD2$ и $VD3$, $VD4$.

Современные усилительные устройства практически всегда выполняются с использованием таких универсальных и дешевых интегральных схем (ИС), как операционные усилители (ОУ). Они имеют сравнительно сложную структуру, однако, как показывает опыт, разработчику измерительной аппаратуры не обязательно знать все тонкости схемотехники и технологии изготовления ОУ. Вместе с тем, не зная общих принципов их построения и современной номенклатуры, трудно ожидать создания надежных устройств с предельным сочетанием точности, быстродействия и потребляемой мощности.

Особенности схемотехнических решений, используемых для построения ИС, обусловлены следующими ограничениями в технологии их изготовления: большими разбросами абсолютных значений параметров элементов, микронными размерами элементов, трудностью технологической совместимости различных активных элементов, отсутствием индуктивности среди элементов ИС. В ИС выгодно применять активные элементы вместо пассивных, занимающих большую площадь кристалла. Элементы, расположенные на кристалле рядом, имеют практически одинаковую температуру и близкие характеристики. Разработчики АИС проектируют их таким образом, чтобы в максимальной степени использовать преимущества полупроводниковой техно-

логии и свести к минимуму влияние ограничений, накладываемых этой технологией.

Основным узлом ОУ является дифференциальный усилитель ДУ (рис. 7.5). Его образуют два транзистора с близкими параметрами VT_1 и VT_2 , нагруженные резисторами R_1 и R_2 с одинаковыми сопротивлениями. В цепь эмиттеров включен генератор тока I_r . В электронике генератором тока принято называть устройство, способное поддерживать в определенных пределах силу вытекающего или вытекающего тока с малой зависимостью от изменения приложенного напряжения. Генераторы тока характеризуются высоким выходным сопротивлением.

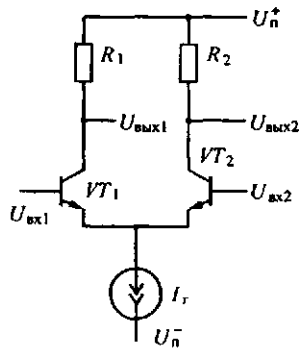


Рис. 7.5. Дифференциальный усилитель

Если R_1 и R_2 равны, то ДУ симметричен относительно генератора постоянного тока I_r и усиливает рассогласование между параметрами элементов плеч, VT_1 , R_1 и VT_2 , R_2 . Вследствие этого ДУ часто называют балансным или разностным (усилитель разницы между двумя сигналами, поданными на входы ДУ). Если $U_{вх1} = U_{вх2}$, т. е. изменения входных сигналов совпадают по фазе и одинаковы по амплитуде, то токи в плечах ДУ постоянны, равны и $U_{вых1} = U_{вых2} = U_n^+ - I_r R_1/2$. Одинаковые входные сигналы ДУ называются синфазными, а ДУ тем лучше, чем меньше изменение $\Delta U_{вых,с} = U_{вых1} - U_{вых2}$ вызывает изменение $U_{вх}$ при $U_{вх1} = U_{вх2}$. В реальном ДУ из-за разбаланса плеч, т. е. разброса параметров резисторов и транзисторов, а также конечного значения выходного сопротивления генератора тока I_r при $U_{вх,с} = U_{вх1} = U_{вх2}$ имеем $\Delta U_{вых,с} \neq 0$. Отношение $\Delta U_{вых,с}/U_{вх,с}$ называется коэффициентом усиления синфазного сигнала.

В основу большинства ОУ общего применения положена трехкаскадная структура (рис. 7.6) с обязательным применением ДУ на входе. Для увеличения входного сопротивления промежуточного каскада (транзисторы $VT_6 \dots VT_{10}$) на его входе включен эмиттерный повторитель на транзисторе VT_6 . Выходной каскад с низким выходным сопротивлением и защитой от короткого замыкания образуют транзисторы $VT_{11} \dots VT_{14}$. На рис. 7.6 приведена упрощенная схема ОУ. Реальные схемы усилителя отличаются друг от друга схемами каскадов, технологией их изготовления и вследствие этого параметрами. В большинстве случаев для понимания особенностей применения ОУ в аппаратуре достаточно иметь представление о работе приведенной схемы.

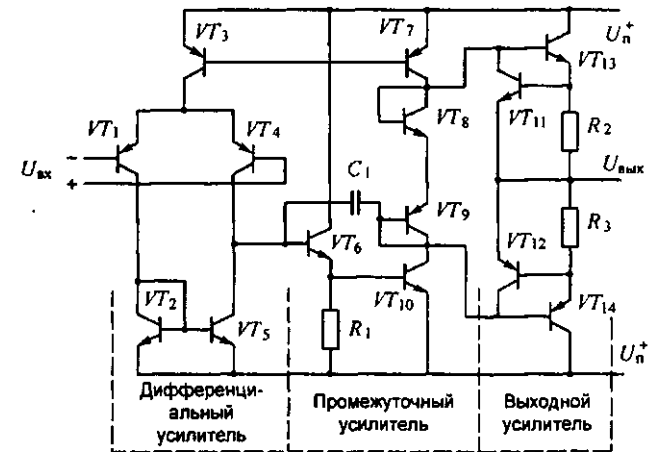


Рис. 7.6. Операционный усилитель

Вследствие большого коэффициента усиления ОУ является высокочувствительным элементом, усиливающим как очень малые полезные сигналы (десятки микровольт), так и собственные шумы и наводки на внешние выводы. Несимметрия монтажа электрических схем, разброс и нестабильность параметров элементов микросхем и компонентов внешних цепей усиливают действие помех. Основной причиной, по которой коэффициент усиления ОУ делают большим, является обеспечение высокой стабильности его параметров при использовании глубокой отрицательной обратной связи (ОС), которая заключается в подаче части или всего выходного напряжения на вход в противофазе.

В зависимости от вида цепи ОС различают инвертирующее и неинвертирующее включения ОУ (рис. 7.8). Схемы этих включений и формулы для вычисления коэффициента усиления по напряжению K_U для постоянного тока и на низких частотах представлены на рис. 7.7.

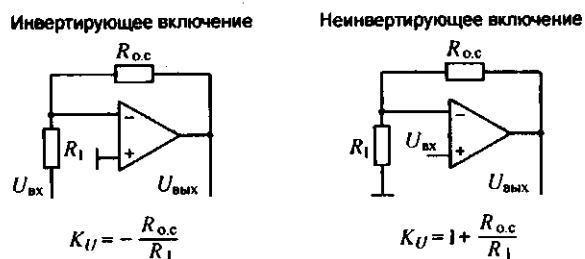


Рис. 7.7. Варианты включения ОУ

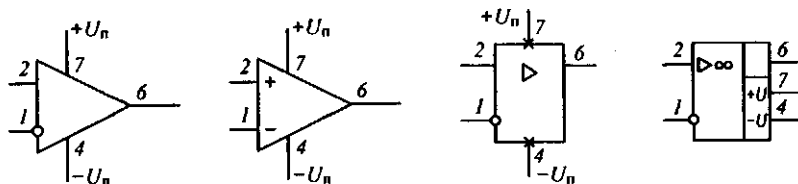


Рис. 7.8. Примеры графического изображения операционного усилителя: 1 — инвертирующий вход; 2 — неинвертирующий вход; 6 — выход; 4, 7 — выходы питания

Усилители переменного напряжения, которые используются в электронных вольтметрах, должны иметь высокий и стабильный коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот, малые нелинейные искажения, быть нечувствительными к изменениям температуры и напряжения питания. Таким требованиям отвечают широкополосные многокаскадные усилители, стабилизированные обратной связью.

Электронные вольтметры обладают рядом ценных качеств. Они имеют большое входное сопротивление, поэтому потребляют малую мощность от цепи, в которой производятся измерения. Диапазон их рабочих частот может простирается от нуля до сотен мегагерц. Значения измеряемых напряжений лежат в области от нескольких микровольт до киловольт.

К недостаткам электронных вольтметров относятся необходимость источника питания, невысокая точность, обусловленная

недостаточной стабильностью электронных элементов (резисторов, ламп, полупроводниковых диодов и транзисторов и т. д.). На электронные вольтметры установлены классы точности от 0,1 до 25. Обычные классы 2,5; 4,0, а на повышенных частотах 6, 10, 15.

Вольтметры средневыпрямленного значения и амплитудные вольтметры имеют также погрешности, зависящие от формы кривой тока. По принципу действия они реагируют на средневыпрямленное и амплитудное значения, но для удобства работы обычно градуируются в среднеквадратических (действующих) значениях напряжения. Такая градуировка может быть произведена только для определенной формы кривой тока. Обычно эта форма предполагается синусоидальной. Поэтому вольтметры средневыпрямленного и амплитудного значений дают правильные показания только при синусоидальной кривой измеряемого напряжения. Если кривая отличается от синусоиды, погрешности могут возрастать до десятков процентов. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен в восьмой главе.

Электронные вольтметры часто входят в состав и являются основой многопредельных комбинированных приборов, позволяющих наряду с напряжением измерять другие электрические величины, например сопротивление. Такие приборы широко используются в лабораторной практике, особенно для радиотехнических измерений.

Для выполнения измерений повышенной точности применяют более сложные приборы. Они выполняются по схемам уравновешивания и используют метод сравнения. К таким приборам относятся компенсаторы (потенциометры) и измерительные мосты.

7.2. Электронно-лучевые осциллографы

Электронно-лучевой осциллограф — прибор для визуального наблюдения электрических процессов, представленных в форме напряжения, а также измерения различных параметров сигналов, определяющих их мгновенные значения и временные характеристики. Кроме того, осциллограф может быть использован для измерения фазового сдвига между двумя синусоидальными напряжениями, частоты и составляющих комплексного сопротивления.

Электронно-лучевые осциллографы строятся на основе электронно-лучевых трубок. Отклонение электронного луча осуществляется непосредственно электрическим сигналом и является практически безынерционным. Исследуемый процесс отображается на люминесцентном экране и может быть зарегистрирован фотографическими средствами.

Основным узлом электронно-лучевого осциллографа является электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), представляющая собой стеклянную вакуумированную колбу, внутри которой имеются источник электронов, система формирования узкого электронного луча, отклоняющие пластины и люминесцентный экран (рис. 7.9).

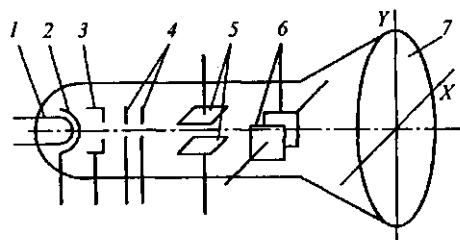


Рис. 7.9

Источником электронов является оксидный катод 2 с подогревателем 1. Число электронов, из которых затем формируется узкий электронный пучок, зависит от напряжения между катодом 2 и модулятором 3. При изменении этого напряжения меняется интенсивность электронного пучка, выходящего за пределы модулятора. Дальнейшее формирование пучка происходит под воздействием напряжений, приложенных к двум анодам 4, один из которых является ускоряющим, а другой — фокусирующим. Часть ЭЛТ, включающая в себя катод, модулятор и два анода, называется электронной пушкой. Назначение электронной пушки — сформировать узкий электронный пучок (луч) необходимой интенсивности. Этот пучок затем проходит между двумя парами взаимно перпендикулярных металлических отклоняющих пластин: вертикально отклоняющих 5 и горизонтально отклоняющих 6, а затем попадает на люминесцентный экран 7 ЭЛТ, образуя на нем яркое пятно. Если к отклоняющим пластинам приложить электрическое напряжение, то между ними будет существовать электрическое поле, которое приведет к горизон-

тальному (вдоль оси X) или вертикальному (вдоль оси Y) отклонению электронного луча. Это отклонение прямо пропорционально напряжению, приложенному к пластинам: $h_x = S_x U_x$; $h_y = S_y U_y$, где h_x , h_y — отклонения вдоль осей X и Y ; S_x и S_y — чувствительности трубки, мм/В; U_x и U_y — напряжения на пластинах X и Y соответственно. Чувствительности S_x и S_y зависят от конструктивных особенностей трубки и напряжения на ускоряющем аноде трубки. Основной функцией осциллографа является отображение формы исследуемого напряжения на экране. Требуемое отображение достигается перемещением электронного луча в вертикальном и горизонтальном направлениях. Перемещение по вертикали происходит под влиянием исследуемого напряжения, приложенного к пластинам Y , а по горизонтали — приложенного к пластинам X напряжения пилообразной формы, называемого напряжением развертки. Последнее вырабатывается специальным генератором развертки. Рассмотрим сначала случай, когда напряжение на вертикально отклоняющих пластинах Y равно нулю, т. е. $U_y = 0$, а на горизонтально отклоняющих пластинах X имеется пилообразное напряжение (рис. 7.10).

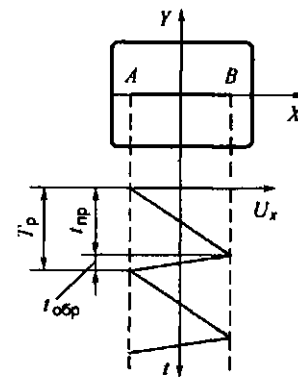


Рис. 7.10

Тогда перемещение электронного луча будет приводить к перемещению пятна на экране от точки A к точке B за время $t_{пр}$, и обратное перемещение за время $t_{обр}$. Таким образом, за время $T_p = t_{пр} + t_{обр}$, называемое периодом развертки, луч осуществит свой прямой и обратный ход. Пилообразное напряжение формируется так, чтобы $t_{пр} \gg t_{обр}$, т. е. $T_p \approx t_{пр}$.

Из-за большой скорости и специального гашения запирающим напряжением обратный ход луча обычно не просматривается. Ввиду того что во время прямого хода луча скорость пятна на экране постоянна, ось X можно отождествить с осью времени t .

Если одновременно к вертикально отклоняющим пластинам Y приложить исследуемое напряжение, то положение луча в каждый момент времени будет однозначно соответствовать значению этого напряжения. На рис. 7.11 показано, как образуется изображение на экране ЭЛТ.

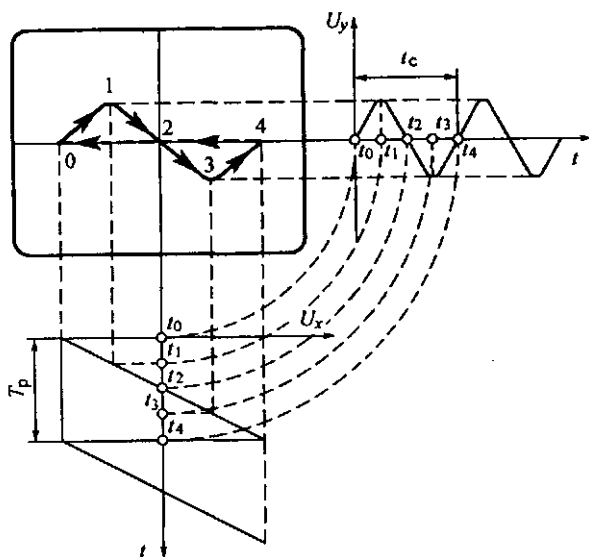


Рис. 7.11

Исследуемое напряжение с амплитудой U_c и периодом T_c подается на пластины Y , напряжение развертки с амплитудой U_p и периодом T_p — на пластины X . Если $T_p = T_c$, то каждому периоду развертки будет соответствовать период исследуемого напряжения и изображение на экране не будет изменяться со временем, оставаясь неподвижным. Это изображение можно построить по точкам, отмечая значения напряжений развертки и сигнала в заданные моменты времени и перенося их на экран. На рис. 7.11 это сделано для моментов времени t_0, t_1, t_2, t_3 и t_4 . Пятно на экране в эти моменты будет занимать положения 0, 1, 2, 3 и 4 соответственно. Полученное таким образом изображение (или его

запись), показывающее, как изменяется исследуемое напряжение от времени, называется осциллограммой. Имея осциллограмму, можно определить многие параметры сигнала: амплитуду, частоту, период и др.

На практике напряжение развертки в течение прямого хода растет со временем не строго линейно. Это приводит к неравномерности масштаба по оси X , т. е. по временной оси. При этих условиях измерение временных интервалов будет сопровождаться ошибками. Поэтому нелинейность развертки нормируется и указывается в паспорте осциллографа наряду с другими нормируемыми параметрами.

Выше отмечалось, что при равенстве периодов развертки и исследуемого напряжения $T_p = T_c$ изображение на экране неподвижно. Оно будет неподвижным и в более общем случае $T_p = nT_c$, где n — целое число. При этом на осциллограмме представляется n периодов исследуемого напряжения. Если же периоды не кратны друг другу, т. е. n не равно целому числу, то кривые, прочерчиваемые электронным лучом на экране в течение каждого периода напряжения развертки, не будут повторять друг друга. Возникнет эффект бегущего изображения или же экран будет заполнен целым семейством сдвинутых относительно друг друга кривых. Выполнение условия $T_p = nT_c$ достигается при помощи синхронизации. Генератору, вырабатывающему напряжение развертки, принудительно навязывается частота синхронизирующего сигнала, равная или кратная частоте исследуемого напряжения. Режим синхронизации может быть внутренним или внешним. В первом случае синхронизирующим является сам исследуемый сигнал, поступающий на генератор развертки, во втором — внешний сигнал, который подается на вход «Внешняя синхронизация» на панели осциллографа.

Генератор развертки работает в двух основных режимах: непрерывном и ждущем. При непрерывной развертке каждый последующий цикл пилообразного напряжения непрерывно следует за предыдущим. Непрерывная развертка удобна, когда исследуется непрерывный периодический процесс или периодическая последовательность импульсов с небольшой скважностью. Если скважность велика, то длительность импульса составляет лишь малую часть периода следования и осциллограмма будет иметь вид вертикальной линии, наблюдение которой не дает информа-

ции о форме импульса. Для изучения импульсных последовательностей большой скважности и непериодических импульсов используется ждущая развертка, при которой напряжение развертки подается на горизонтально отклоняющие пластины лишь тогда, когда исследуемый импульс поступает на вход вертикально отклоняющих пластин. Длительность прямого хода развертки обычно выбирается немного больше длительности импульса для того, чтобы он помещался на экране осциллографа и занимал большую его часть.

В некоторых случаях вместо линейной развертки используют круговую или спиральную. Увеличение длины развертки позволяет повысить точность измерения интервалов времени. Чтобы получить круговую траекторию электронного луча, на вертикально и горизонтально отклоняющие пластины подаются синусоидальные напряжения одной и той же частоты и амплитуды, сдвинутые между собой по фазе на $\pi/2$. Чтобы развертка была не круговой, а спиральной, амплитуды напряжения на пластинах должны линейно уменьшаться от U_{\max} до U_{\min} за время, равное длительности развертки. Исследуемый сигнал подается на модулятор, который управляет яркостью свечения пятна на экране.

Структурная схема осциллографа приведена на рис. 7.12.

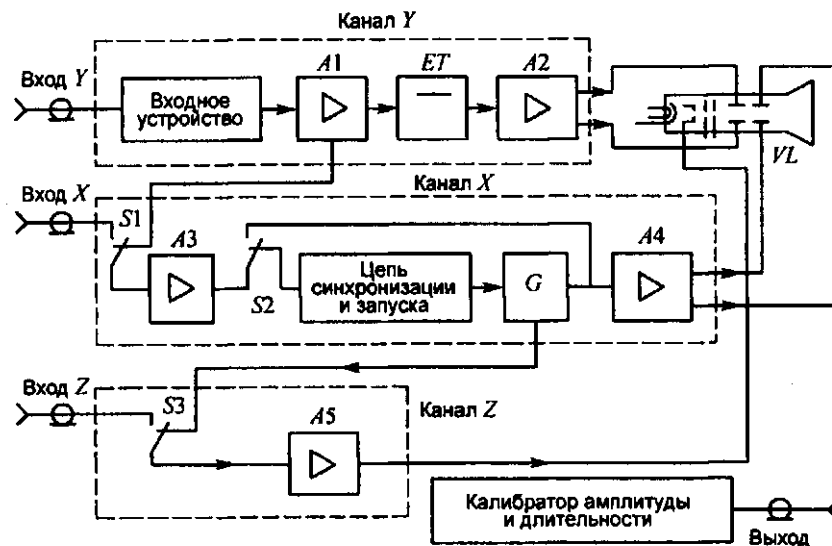


Рис. 7.12

Кроме электронно-лучевой трубки *VL* она содержит канал вертикального отклонения (канал *Y*), канал горизонтального отклонения (канал *X*), канал управления яркостью (канал *Z*), а также калибратор амплитуды и длительности. Исследуемое напряжение поступает на входное устройство канала *Y*, которое включает в себя аттенуатор, позволяющий при необходимости ослабить сигнал и согласовать сопротивление канала с сопротивлением источника сигнала. Усилители *A1* и *A2* являются предварительным и окончательным усилителями соответственно. Линия задержки *ET* используется при работе осциллографа в ждущем режиме. Она позволяет подавать исследуемый импульсный сигнал на пластины *Y* с задержкой относительно начала периода пилообразного напряжения. Это дает возможность наблюдать фронт исследуемого импульса неискаженным. Без линии задержки не удалось бы наблюдать часть импульса, которая приходится на время, необходимое для формирования напряжения развертки.

Канал *X* служит для формирования и (или) усиления напряжения, поступающего затем на горизонтально отклоняющие пластины и вызывающего горизонтальное перемещение луча. Канал *X* содержит предварительный и окончательный усилители (*A3* и *A4* соответственно), цепь синхронизации и запуска, а также генератор развертки *G*. Переключатель *S1* служит для подачи синхронизирующего напряжения с канала *Y* (внутренняя синхронизация) или со входа *X* (внешняя синхронизация). Если переключатели *S1* и *S2* находятся в левом положении, то генератор развертки отключается и на пластины *X* поступает (через усилители *A3* и *A4*) напряжение со входа *X*.

Канал *Z* служит для управления яркостью свечения экрана ЭЛТ. Управление производится как вручную, так и автоматически. Например, производится автоматическое подсвечивание прямого хода ждущей развертки. В промежутке между импульсами, запускающими ждущую развертку, яркость пятна снижена во избежание прожигания люминофорного слоя.

Калибратор амплитуды и длительности является источником напряжений с известной амплитудой и длительностью. Эти напряжения подаются с выхода калибратора на вход *Y* для контроля масштабов (коэффициентов отклонения) по осям *Y* (В/см, мВ/см или В/деление, мВ/деление) и *X* (мкс/см, мс/см или с/см). Знание масштабов необходимо для измерения напряже-

ний и интервалов времени, поскольку непосредственно оператору доступно считывание только расстояний (сантиметры, деления) по масштабной сетке на экране.

Электронные осциллографы характеризуются рядом технических и метрологических параметров. К наиболее важным относятся следующие:

- калиброванные значения коэффициента отклонения;
- полоса пропускания, т. е. диапазон частот, в пределах которого коэффициент усиления канала Y уменьшается на 3 дБ по отношению к некоторой опорной частоте;
- диапазон изменения длительности развертки;
- входное сопротивление и входная емкость канала Y ;
- точностные параметры, характеризующие погрешности измерения напряжения и интервалов времени.

При выборе осциллографа следует исходить из характера измеряемого сигнала (гармонический или импульсный) и его вероятных параметров (ширина спектра, граничные частоты, частота следования, скважность, амплитуда напряжения и т. д.).

Осциллографы подразделяются на универсальные, скоростные, стробоскопические, запоминающие, специальные. Наиболее употребительными являются универсальные осциллографы (в ГОСТ обозначение С1). Они позволяют проводить исследования электрических сигналов в широком диапазоне частот, амплитуд и длительностей сигналов. Полоса пропускания достигает 200–350 МГц, диапазон амплитуд от единиц милливольт до сотен вольт. Возможно измерение длительностей импульсов от нескольких наносекунд до секунд. На рис. 7.13 показан внешний вид типичного универсального электронно-лучевого осциллографа.

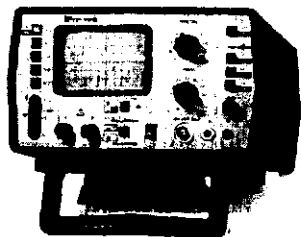


Рис. 7.13. Электронно-лучевой осциллограф С1-112А

Для одновременного исследования нескольких сигналов используют многолучевые осциллографы. Обычно они имеют два канала вертикального отклонения, однако выпускаются также осциллографы с большим числом каналов (до пяти).

7.3. Цифровые осциллографы

В последнее время все большее распространение получают электронные осциллографы с цифровой обработкой сигнала. В таких приборах аналоговый блок, представляющий собой обычный (аналоговый) осциллограф, дополнен блоком дискретизации аналогового сигнала и цифровым блоком. В состав последнего входят микропроцессор, который управляет процессами преобразования сигналов и процедурой измерения, а также клавиатура, позволяющая вводить необходимые программы. Введение цифровой обработки значительно расширило возможности осциллографа. Появилась возможность автоматизации управления его работой, увеличения производительности. Измеряемая информация может быть подвергнута необходимой обработке, упорядочению и запоминанию. Параметры сигнала в цифровой форме отображаются на жидкокристаллическом дисплее. Отсутствие электронно-лучевой трубки позволяет минимизировать размеры прибора (рис. 7.14). В одном корпусе размером 250 × 146 × 60 мм помещаются четыре прибора:

- двухканальный цифровой осциллограф 20 МГц;
- частотомер 20 МГц;

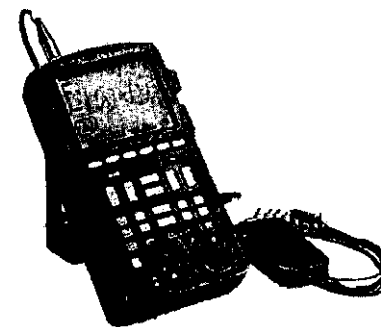


Рис. 7.14. Осциллограф двухканальный DG SCOPE 20MHz

- логический анализатор на 8 каналов;
- цифровой мультиметр, $3\frac{1}{2}$ разряда, автоматический выбор диапазонов.

Данные запоминаются и через порт RS-232 могут передаваться на принтер или компьютер для дальнейшей обработки. Работает в среде DOS и Windows.

Массивы информации могут быть представлены на экране в виде гистограмм, графиков, таблиц и т. д. По желанию оператора можно изменить масштаб, вычлнить и растянуть какую-либо часть осциллограммы, наложить друг на друга или одновременно представить на экране несколько зависимостей. Автоматическая калибровка в ходе измерения, коррекция погрешностей, уменьшение влияния помех благодаря усреднению сигнала за большое число периодов приводит к существенному повышению точности измерений. Возможность вычисления и отображения на экране преобразования Фурье исследуемого сигнала, дифференцирования, интегрирования и других операций качественно меняют характер получаемой информации.

Рассмотрим типовую блок-схему двухканального цифрового осциллографа, показанную на рис. 7.15.

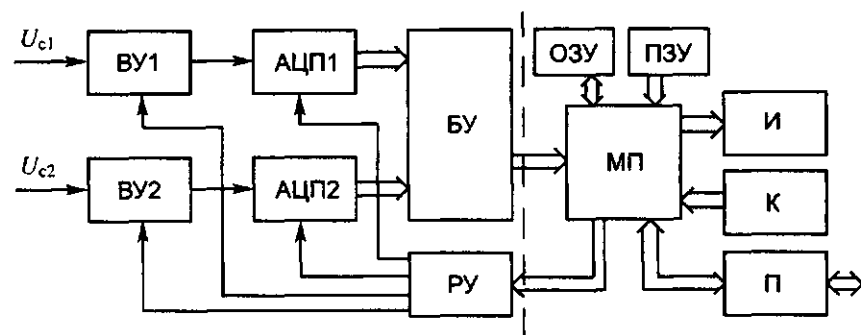


Рис. 7.15

Здесь исследуемые сигналы U_{c1} и U_{c2} через входные устройства ВУ1 и ВУ2 поступают на аналогово-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2, где преобразуются в цифровой код. Последовательность цифровых данных, соответствующая длительности рабочего хода развертки обычного осциллографа по двум каналам запоминается в буферном устройстве БУ. Дальнейшая обра-

ботка информации происходит в микропроцессоре МП по программе, хранимой в постоянном запоминающем устройстве ПЗУ. Текущие данные и результаты вычислений записываются в оперативное запоминающее устройство ОЗУ. Управление режимами работы ВУ и АЦП производится МП через регистр управления РУ. Клавиатура К служит для оперативного управления режимами работы и обработки данных в цифровом осциллографе, а порт П предназначен для связи с внешними устройствами, например, с персональным компьютером для запоминания данных, их сравнения с результатами предыдущих измерений, вторичной обработки по сложным алгоритмам и т. д.

Существует упрощенный вариант цифрового осциллографа, называемый компьютерным осциллографом. Прибор выполнен в виде приставки к компьютеру, в нем расположены только блоки слева от штриховой линии на рис. 7.16. В таком устройстве данные из ВУ через стандартный порт (*LPT* или *USB*) поступают в компьютер на обработку и отображение. Через этот же порт происходит управление ВУ и АЦП со стороны компьютера. Кроме аппаратной части, компьютерный осциллограф обязательно включает программное обеспечение, выводящее на монитор компьютера окошко с экраном и кнопками, напоминающее переднюю панель обычного осциллографа (рис. 7.16).

Оценим скорость поступления информации по входам цифрового осциллографа.

Пусть максимальная частота исследуемого сигнала по каждому каналу равна f_{\max} . По теореме Котельникова выборка данных и преобразование их в цифровой код должны происходить с частотой не ниже $2f_{\max}$. Обычно используются 8...16 битные АЦП, тогда за секунду в МП или компьютер должно поступать не менее $(16...32)f_{\max}$ бит информации. Даже если ограничиться сравнительно низкой для аналоговых осциллографов частотой $f_{\max} = 10$ МГц, то окажется, что с учетом двух каналов суммарная скорость поступления данных будет составлять 320...640 Мбит/с, что превышает максимальную пропускную способность быстродействующего порта *USB*. Таким образом передать, а тем более обработать эти громадные потоки информации стандартными вычислительными средствами в режиме реального времени практически невозможно.

Для выхода из этого затруднения в схеме цифрового осциллографа (см. рис. 7.15) после АЦП, как правило, устанавливает-

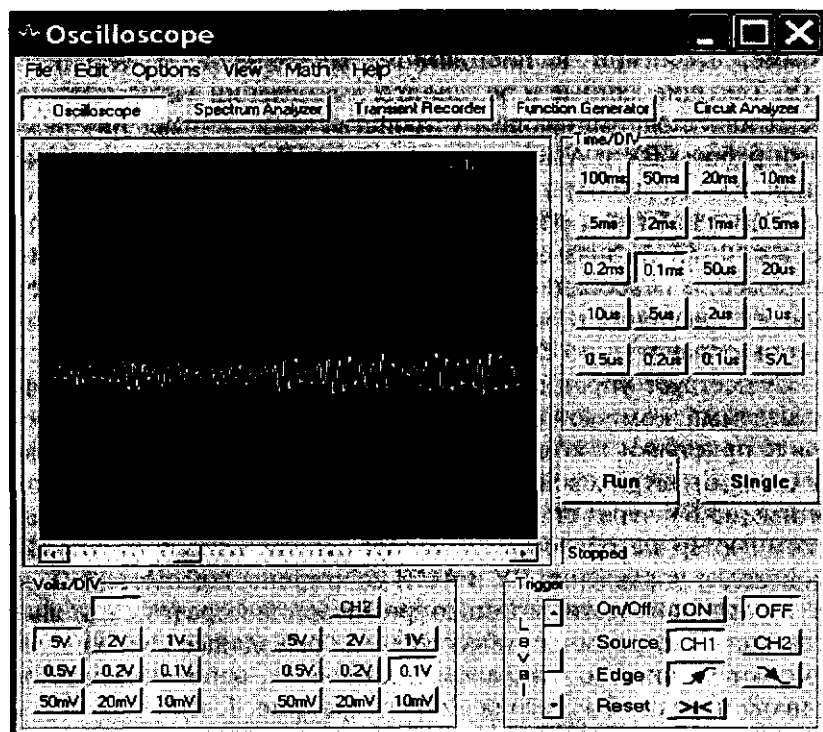


Рис. 7.16. Окно управляющей программы *Oscilloscope*

ся БУ, предназначенное для запоминания данных за сравнительно короткий интервал времени, который условно можно назвать, как у обычного осциллографа «периодом развертки». После завершения одного такого периода БУ прекращает запись данных с АЦП и начинает передавать их в МП со скоростью, на которую рассчитаны аппаратные средства. Из-за низкой скорости, время передачи может во много раз превышать время записи. После передачи всех данных в МП, происходит запись в БУ новой порции информации и т. д. Таким образом, анализ входного сигнала происходит циклически, и за сравнительно большое время между циклами программа обработки успевает выполнить все необходимые операции.

Заметим, что практически все методы осциллографических измерений, доступные для аналоговых осциллографов, находят применение и дальнейшее развитие в цифровых осциллографах.

Это относится к способам получения круговой развертки, панорамным, спектральным и другим видам измерений. Только аналоговые методы преобразования сигналов, необходимые для реализации этих методов, заменены соответствующими вычислениями.

Контрольные вопросы

1. Какие требования предъявляются к усилителю постоянного тока?
2. Каково главное преимущество электронных вольтметров?
3. Как добиться неподвижного изображения периодического сигнала на экране осциллографа?
4. Какая развертка используется для наблюдения непериодических импульсов?
5. Каковы дополнительные возможности цифровых осциллографов?

Глава 8

ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

8.1. Основные понятия

Цифровыми измерительными приборами (ЦИП) называются приборы, которые в процессе измерения осуществляют автоматическое преобразование непрерывной измеряемой величины в дискретную с последующей индикацией результата измерений на цифровом отсчетном устройстве или регистрации его при помощи цифрпечатающего устройства.

Процесс преобразования аналоговой формы сигнала в цифровую называется аналого-цифровым преобразованием, а преобразователь, осуществляющий это преобразование, — *аналого-цифровым преобразователем* (АЦП).

В последние годы цифровые приборы получили большое распространение, особенно в качестве лабораторных вольтметров, амперметров, омметров, частотомеров и фазометров. По сравнению с аналоговыми приборами цифровые имеют такие преимущества, как высокая точность, широкий рабочий диапазон, высокое быстродействие, получение результатов измерения в удобной для считывания оператором форме, возможность цифрового преобразования и ввода измерительной информации в ЭВМ, автоматического введения поправок для уменьшения систематических погрешностей, автоматической калибровки, автоматизации процесса измерения.

Недостатками цифровых приборов являются меньший диапазон рабочих температур и необходимость в источнике питания измерительных и регистрирующих устройств.

Обобщенная функциональная схема ЦИП показана на рис. 8.1. Измеряемая величина $x_{изм}$ подается на входное устройство ВУ, предназначенное для масштабного преобразования входной величины и отделения ее от помех, если они имеются. Аналого-цифровой преобразователь преобразует величину x в код N , который подается на цифровое отсчетное устройство ЦОУ, где индицируется в виде ряда цифр; код N может выводиться и во внешние устройства, например в ЭВМ для дальнейшей обработки или хранения. Управляет работой ЦИП устройство управления УУ путем выработки определенной последовательности командных сигналов во все функциональные узлы ЦИП.

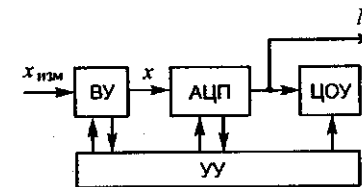


Рис. 8.1. Обобщенная структурная схема ЦИП

Аналого-цифровые преобразователи имеют важное самостоятельное значение. Они широко используются для связи первичных преобразователей электрических и неэлектрических величин с цифровыми вычислительными машинами, микропроцессорами и другими устройствами накопления и обработки результатов наблюдений. Интегральные микросхемы АЦП производятся миллионными тиражами, что позволило снизить их цену и сделать доступными для производства недорогой высококачественной измерительной аппаратуры.

По виду измеряемых величин ЦИП подразделяются на:

- вольтметры постоянного и переменного тока;
- омметры и мосты постоянного и переменного тока;
- комбинированные приборы;
- измерители частоты и интервалов времени;
- специализированные ЦИП, предназначенные для измерения температуры, массы грузов, скоростей, времени срабатывания различных элементов и т. п.

Диапазон измеряемых посредством ЦИП величин обычно широкий и разбивается на ряд поддиапазонов. Выбор нужного

поддиапазона в процессе измерения производится вручную или автоматически. Измерение на выбранном поддиапазоне всегда происходит автоматически.

8.2. Аналого-цифровые преобразователи и цифровые вольтметры

Аналого-цифровые преобразователи — устройства, которые принимают входные аналоговые сигналы и генерируют соответствующие им цифровые коды, пригодные для обработки микропроцессорами и другими цифровыми устройствами.

Принципиально не исключена возможность непосредственного преобразования различных физических величин в цифровую форму, однако эту задачу удастся решить лишь в редких случаях из-за сложности таких преобразователей. Поэтому в настоящее время наиболее рациональным признается способ преобразования различных по физической природе величин сначала в аналоговые электрические сигналы в виде тока или напряжения с амплитудой, пропорциональной измеряемой величине, а затем уже с помощью АЦП их переводят в цифровую форму.

В настоящее время известно большое число методов преобразования напряжение—код. Эти методы существенно отличаются друг от друга точностью, скоростью преобразования и сложностью аппаратной реализации. На рис. 8.2 представлена классификация АЦП по методам преобразования.

В основу классификации АЦП положен признак, указывающий на то, как во времени разворачивается процесс преобразования аналоговой величины в цифровую. В основе преобразования выборочных значений сигнала в цифровые эквиваленты лежат операции квантования и кодирования. Они могут осуществляться с помощью либо последовательной, либо параллельной, либо последовательно-параллельной процедур приближения цифрового эквивалента к преобразуемой величине.

Параллельный АЦП является самым быстрым. Например, восьмиразрядный преобразователь типа *MAX108* позволяет получить 1,5 млрд отсчетов в секунду при времени задержки прохождения сигнала не более 2,2 нс. Недостатком этой схемы является малая разрядность.

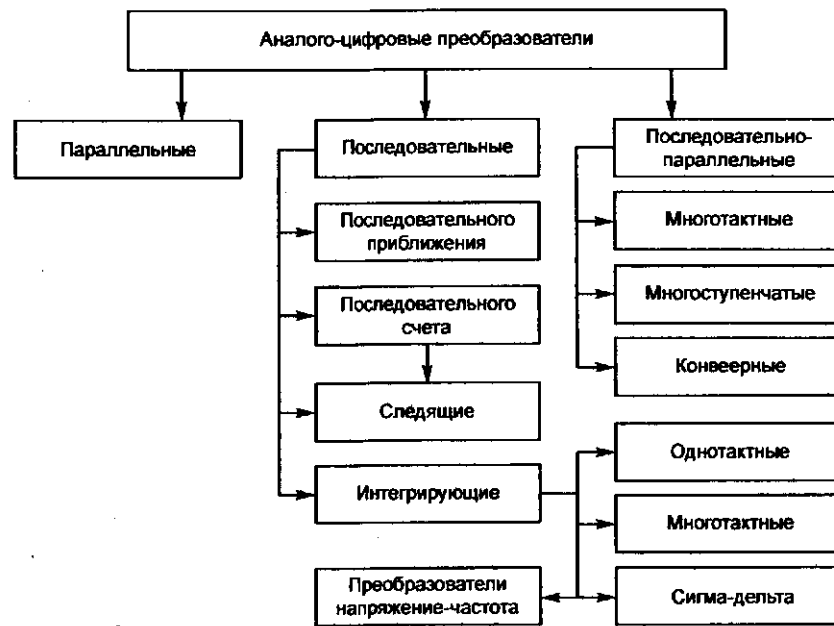


Рис. 8.2. Классификация АЦП

Последовательно-параллельные АЦП занимают промежуточное положение по разрешающей способности и быстродействию между параллельными АЦП и АЦП последовательного приближения.

Особенностью *АЦП последовательного счета* является небольшая частота дискретизации, достигающая всего лишь нескольких кГц. Достоинством АЦП данного класса является сравнительная простота построения, определяемая последовательным характером выполнения процесса преобразования. В настоящее время такие АЦП не изготавливаются в виде отдельных интегральных микросхем, однако входят в состав микросхем для управления электродвигателями, например *ADMC330*. Недостатком последовательных АЦП является низкая помехоустойчивость результатов преобразования. Действительно, выборка мгновенного значения входного напряжения, обычно включает слагаемое в виде мгновенного значения помехи. В дальнейшем при цифровой обработке последовательности выборок эта составляющая может быть подавлена, однако на это требуется время и дополнительные вычислительные ресурсы.

В АЦП многотактного интегрирования, входной сигнал интегрируется либо непрерывно, либо на определенном временном интервале, длительность которого обычно выбирается кратной периоду помехи. Это позволяет во многих случаях подавить помеху еще на этапе преобразования. Платой за это является пониженное быстродействие интегрирующих АЦП.

АЦП многотактного интегрирования были изобретены более 40 лет назад и сразу же стали основой для цифровых вольтметров высокой точности. Прорывом в этой области техники стала разработка в середине 70-х годов прошлого века Л. Эвансом и Д. Бингемом (США) АЦП двухтактного интегрирования ICL7106 (отечественный аналог — 572ПВ2), который и сегодня выпускается многими фирмами. Варианты этого АЦП являются «мозгом» современных цифровых мультиметров. Наибольшее распространение из время-импульсных методов, реализуемых в АЦП, нашли различные варианты метода двойного интегрирования, обеспечивающего измерение среднего (за интервал интегрирования) значения U_x . Распространение этого метода обусловлено его очевидными достоинствами: возможностью подавления напряжения помех, получением высокой точности при относительной простоте схемы, возможностью полной реализации на ИМС.

В АЦП двойного интегрирования преобразование U_x в пропорциональный ему временной интервал T_x осуществляется путем интегрирования сначала измеряемого U_x , а затем опорного $U_{он}$ напряжений. В первом такте в течение времени T_n производится интегрирование входного напряжения U_x , в результате чего напряжение на выходе интегратора

$$U_1(t) = \frac{1}{RC} \int_0^t U_x dt = \frac{U_x}{RC} t,$$

где RC — постоянная времени интегратора; t — независимая переменная величина (время).

В конце интервала интегрирования напряжение на выходе интегратора $U_1(T_n) = U_x T_n / RC$.

В течение второго такта интегрируется опорное напряжение $U_{он}$, имеющее противоположную по отношению к U_x полярность. Интегрирование опорного напряжения продолжается до тех пор, пока выходное напряжение интегратора снова не станет

равным нулю. Поэтому в течение времени второго такта напряжение на выходе интегратора

$$U_2(t) = \frac{U_x}{RC} \int_0^t U_{он} dt = \frac{U_x}{RC} T_n - \frac{U_{он}}{RC} t,$$

а в конце этого периода

$$U_2(T_x) = U_x T_n / RC - U_{он} T_x / RC,$$

откуда $T_x = U_x T_n / U_{он}$. Преобразование временного интервала T_x в эквивалентное число импульсов N_x осуществляется путем заполнения T_x импульсами генератора опорной частоты и подсчета их числа счетчиком: $N_x = U_x T_n f_{он}$ ($f_{он}$ — частота генератора опорной частоты).

Интервал интегрирования T_n формируется обычно путем заполнения счетчика импульсами от генератора опорной частоты и равен в этом случае $T_n = N / f_{он}$ (N — емкость счетчика), тогда $N_x = U_x N / U_{он}$.

Из уравнения $T_x = F(U_x)$ видно, что временной интервал T_x , пропорциональный U_x , не зависит от постоянной времени интегратора RC , а зависит от значений $U_{он}$ и T_n , которые могут поддерживаться постоянными с высокой точностью. В этом основное преимущество метода двойного интегрирования. Достоинством метода является также то, что значение N_x не зависит от начального напряжения интегратора и долговременной нестабильности T_n и $U_{он}$.

Структурная схема ЦИП с применением АЦП, основанного на методе двойного интегрирования, приведена на рис. 8.3, а временные диаграммы, поясняющие его работу, — на рис. 8.4. После запуска устройства управления (момент t_1) на счетчик и запоминающее устройство подается сигнал, устанавливающий их в исходное (нулевое) состояние. В момент t_2 с устройства управления подается сигнал, который ключ $Кл_2$ размыкает, а ключ $Кл_1$ устанавливает в положение 1, когда на вход интегратора подается U_x , например U_1 . Ключ $Кл_1$ находится в положении 1 в течение времени T_n , при этом напряжение на выходе интегратора $U_{инт}$ возрастает до значения U_1' (первый такт работы прибора). Интервал интегрирования T_n формируется следующим образом. В момент t_2 на один из входов схемы И с устройства управления подается сигнал, по которому с выхода схемы И на вход

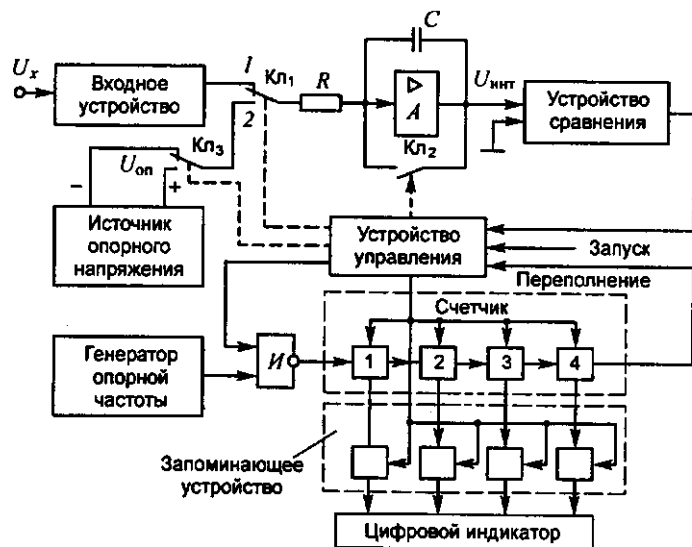


Рис. 8.3. Структурная схема ЦИП с АЦП двойного интегрирования

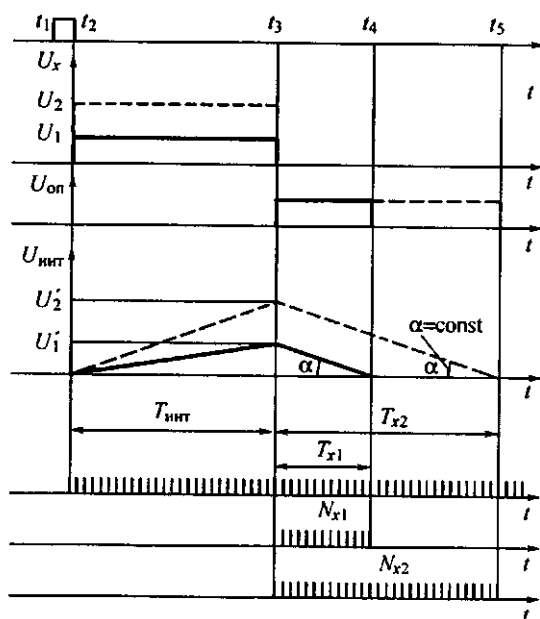


Рис. 8.4. Временные диаграммы работы АЦП двойного интегрирования

счетчика подаются импульсы с генератора опорной частоты, подаваемые на второй вход схемы *И*. Счет этих импульсов идет до полного заполнения счетчика. На рис. 8.3 счетчик имеет четыре декады, следовательно, счет идет до 10^4 импульсов. После того как в счетчике зафиксирован 9999 импульсов, следующий (десяти тысячный) импульс возвращает его в исходное состояние и с последней декады на устройство управления подается сигнал переполнения, по которому ключ K_1 устанавливается в положение 2.

В течение интервала T_n состояние счетчика не переносится в запоминающее устройство и не индицируется на цифровом индикаторе.

Интервал интегрирования $T_{\text{инт}} = NT_0 = N/f_0$ (N — емкость счетчика) формируется числом импульсов генератора опорной частоты f_0 , и его постоянство определяется стабильностью генератора.

Когда ключ K_1 переключится в положение 2 (момент t_3), на вход интегратора будет подаваться опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ с полярностью, противоположной U_x (определяется положением ключа K_3). Начинается второй такт работы прибора, когда напряжение на выходе интегратора начинает уменьшаться от значения U_1' до нуля (момент t_4). Состояние $U_{\text{инт}} = 0$ определяет устройство сравнения (компаратор), которое в этот момент выдает импульс в устройство управления. Устройство управления снимает сигнал со схемы *И*, и импульсы с генератора опорной частоты на счетчик не подаются. Число импульсов N_x , подсчитанное счетчиком в интервале $T_x = t_4 - t_3$, пропорционально U_x . Оно фиксируется в запоминающем устройстве и индицируется на цифровом индикаторе до прихода следующего импульса запуска.

На рис. 8.4 показано, как изменяются напряжение на выходе интегратора и временной интервал T_x для различных значений U_x . Угол наклона графика интегрирования α при разряде постоянен, так как напряжение на входе и постоянная времени интегратора в процессе измерения не меняются, это и дает возможность получить время разряда интегратора T_x , пропорциональное U_x .

Цифровые вольтметры (ЦВ) имеют низкий порог реагирования обычно (10 или 1 мкВ), поэтому очень важно, чтобы результат измерения мало зависел от помех и наводок во входной

цепи ЦВ, уровень которых часто значительно больше порога реагирования ЦВ.

В ЦВ на основе двухтактного интегрирования эффективное подавление помехи нормального вида достигается путем выбора длительности первого такта интегрирования равным или кратным целому числу периодов помехи. В соответствии с принципами действия таких ЦВ результат измерения прямо пропорционален среднему значению измеряемого напряжения на первом такте интегрирования, а среднее значение синусоидальной помехи за период равно нулю. Но частота сетевого напряжения не строго постоянна и может изменяться в пределах $50 \pm 0,5$ Гц. В ЦВ с постоянной длительностью интервала $t_{\text{инт}}$ (рис. 8.4) последнее обстоятельство накладывает ограничение на степень подавления помехи. В связи с этим в таких ЦВ также применяют входные фильтры для большего подавления помех.

Комбинированные цифровые приборы позволяют измерять несколько электрических величин, например напряжений постоянного и переменного тока, сопротивления постоянному току, емкости, индуктивности в их различном сочетании. Как правило, основой комбинированного прибора является ЦВ постоянного тока интегрирующего типа; кроме него прибор содержит ряд преобразователей различных электрических величин в напряжение постоянного тока. Так, при измерении токов в качестве преобразователей применяются шунты, при измерении напряжений переменного тока — выпрямители на полупроводниковых диодах.

Преобразование сопротивлений в напряжение обычно производится с помощью операционного усилителя. Одна из возможных схем такого преобразователя показана на рис. 8.5. Измеряемое сопротивление R_x включено в цепь ООС по напряжению операционного усилителя ОУ с большим коэффициентом усиления. Ко входу усилителя через резистор R_0 подключен ис-

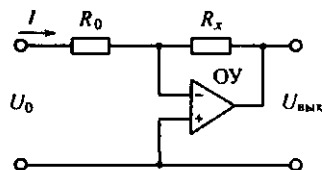


Рис. 8.5. Преобразователь сопротивления в напряжение

точник постоянного напряжения U_0 . В нормальном режиме работы разность потенциалов на входе усилителя близка к нулю, иначе ОУ перейдет в режим отсечки или насыщения. Это дает основание считать, что ток $I = U_0/R_0$. Если входной ток ОУ пренебрежимо мал, ток I будет протекать через R_x и выходное напряжение будет равно:

$$U_{\text{вых}} = IR_x = U_0 R_x / R_0,$$

где U_0 и R_0 — величины постоянные и стабильные, поэтому преобразователь является линейным преобразователем сопротивления в напряжение.



Рис. 8.6. Комбинированный переносный цифровой измерительный прибор

Современные комбинированные приборы имеют малые вес и габариты при высокой степени автономности, что делает их чрезвычайно удобными на практике (рис. 8.6).

Контрольные вопросы

1. Какое устройство преобразует непрерывный сигнал в дискретный?
2. Каковы преимущества цифровых измерительных приборов?
3. Какой тип АЦП приобрел самое широкое распространение?
4. Как осуществляется подавление помехи с частотой 50 Гц в цифровых вольтметрах на основе двухтактного интегрирования?

Глава 9

ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ

9.1. Методы измерения постоянных токов и напряжений

Для измерения постоянных токов можно использовать прямые и косвенные измерения. Для измерения напряжений используют только прямые измерения.

При прямых измерениях ток и напряжение можно измерять приборами магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и ферродинамической систем, а также электронными и цифровыми приборами. Напряжение можно измерять приборами электростатической системы и потенциометрами постоянного тока.

Постоянные токи от 1 мкА до 6 кА и напряжения от 1 мВ до 1,5 кВ обычно измеряют приборами магнитоэлектрической системы. В микро- и миллиамперметрах этой системы весь ток протекает через рамку измерительного механизма. Этот ток, как правило, не превышает 20...50 мА. Для расширения пределов измерения измерительного механизма по току используют шунты, а по напряжению — добавочные резисторы.

Сопротивление амперметра отлично от нуля, а сопротивление вольтметра не равно бесконечности, поэтому включение амперметра или вольтметра в электрическую цепь изменяет измеряемую величину. Погрешность, возникающая в результате включения измерительных приборов в исследуемую цепь и обусловленная потребляемой ими мощностью, называется *методической погрешностью*.

Определим методическую погрешность, возникающую при включении амперметра в электрическую цепь. Пусть требуется

измерить ток в цепи, имеющей сопротивление R , к которой приложено напряжение U (рис. 9.1, а). Ток I_x в этой цепи будет равен:

$$I_x = UR.$$

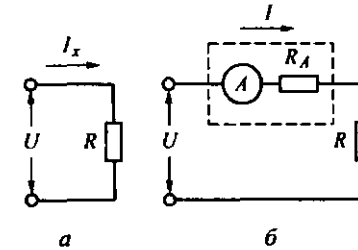


Рис. 9.1. Влияние амперметра на измеряемый ток

После включения амперметра, имеющего сопротивление R_A , ток в цепи изменится и станет равным:

$$I = U/(R + R_A).$$

Амперметр покажет именно это значение тока (рис. 9.1, б). Методическая погрешность, вызванная включением амперметра, составит:

$$\delta_A = \frac{I - I_x}{I_x} = -\frac{R_A/R}{1 + R_A/R}.$$

Обычно $R_A \ll R$, поэтому $\delta_A \approx -R_A/R$. Так как

$$R_A/R = I^2 R_A / I^2 R = P_A / P,$$

то

$$\delta_A \approx -P_A / P,$$

где P_A — мощность, потребляемая амперметром; P — мощность, потребляемая исследуемой цепью.

Рассмотрим случай, когда надо измерить падение напряжения U_x на некотором сопротивлении R :

$$U_x = IR = \varepsilon R / (R + R_0),$$

где ε — ЭДС источника тока; R_0 — внутреннее сопротивление источника тока (рис. 9.2, а).

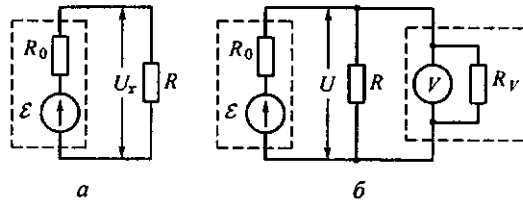


Рис. 9.2. Влияние вольтметра на измеряемое напряжение

После включения вольтметра, имеющего собственное сопротивление R_V , параллельно сопротивлению R напряжение U , измеренное вольтметром, составит:

$$U = \frac{\varepsilon R R_V / (R + R_V)}{R_0 + R R_V / (R + R_V)} = \frac{\varepsilon R R_V}{R R_0 + R_V R_0 + R R_V}$$

Методическая погрешность измерения δ_V в этом случае будет равна:

$$\delta_V = \frac{U - U_x}{U_x} = - \frac{R/R_V}{1 + R/R_V + R/R_0}$$

Учитывая, что

$$\frac{R}{R_V} = \frac{U^2/R_V}{U^2/R} = \frac{P_V}{P}$$

и обычно $R_V \gg R$, получаем:

$$\delta_V \approx - \frac{P_V/P}{1 + R/R_0},$$

где P_V — мощность, потребляемая вольтметром; P — мощность, потребляемая исследуемым резистором R (рис. 9.2, б).

Следовательно, как при измерении тока, так и при измерении напряжения необходимо выбирать такие приборы, у которых потребляемая мощность значительно меньше мощности, рассеиваемой в исследуемой цепи. Этим и объясняется стремление иметь в амперметрах возможно меньшее, а в вольтметрах возможно большее сопротивление.

Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы успешно сочетают высокую точность с малым потреблением

мощности и имеют равномерную шкалу. Наиболее точные приборы магнитоэлектрической системы имеют классы точности 0,1; 0,2.

Приборы электродинамической системы предназначены для измерения токов от 10 мА до 100 А и напряжений от 100 мВ до 600 В. По точности они эквивалентны приборам магнитоэлектрической системы, но потребляют значительно большую мощность и имеют неравномерную шкалу.

Приборы ферродинамической системы применяются для измерения постоянных токов и напряжений очень редко из-за низкой точности и большой потребляемой мощности.

Приборы электромагнитной системы используются для измерения токов от 10 мА до 200 А и напряжений от 1 В до 75 В. Наиболее точные приборы этой системы имеют классы точности 0,2; 0,5. Их главное достоинство — низкая стоимость.

Для измерения постоянных напряжений в диапазоне от нескольких вольт до нескольких сотен киловольт применяются также электростатические вольтметры. Их преимущество заключается в ничтожном потреблении мощности от объекта измерения. Наиболее точные приборы этой системы имеют класс точности 0,05. Однако точные электростатические приборы очень сложны и дороги и выпускаются в небольшом количестве. Подавляющее же большинство вольтметров этой системы имеет классы точности 0,5; 1,0 и 1,5.

При напряжениях, не превышающих 600 В, вместо приборов электростатической системы можно применять вольтметры электронной системы. Они также потребляют ничтожную мощность. Класс точности электронных вольтметров постоянного тока невысокий: лучшие из них имеют классы точности 0,5; 1,0.

В тех случаях, когда необходимо измерить напряжение или ток с высокой точностью, используют потенциометры постоянного тока, цифровые вольтметры и амперметры. Классы точности наиболее точных потенциометров 0,001; 0,002, цифровых вольтметров 0,002; 0,005, цифровых амперметров 0,02. Цифровые вольтметры измеряют напряжение до нескольких тысяч вольт, а цифровые амперметры — ток до нескольких ампер. Потенциометрами постоянного тока при использовании делителей напряжения можно измерять напряжение до 1000 В.

Измерение тока при помощи потенциометра проводят косвенным путем — искомый ток определяют по падению напряже-

сплава, удлиняясь, перемещал стрелку. На шкале такого прибора там, где обозначены его характеристики, можно увидеть знак, изображенный на рис. 9.4, а. К сожалению, тепловые приборы имеют множество недостатков, делающих их мало пригодными для точных измерений, а те, у которых недостатки (например, зависимость показаний от температуры окружающей среды) устранены, слишком сложны и дороги.

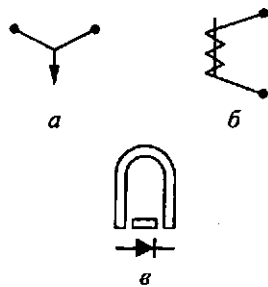


Рис. 9.4. Условные обозначения приборов для измерения переменного тока или напряжения

Согласно закону Джоуля, количество тепла, выделяющегося на нагрузке с активным сопротивлением, пропорционально квадрату приложенного к нему напряжения, поэтому эффективное значение часто называют среднеквадратичным. Чтобы измерить эффективное значение переменного напряжения (тока), необходимо в течение некоторого времени возводить в квадрат его мгновенные значения, усреднить результаты и извлечь из среднего квадратный корень. Благодаря тому что тяговое усилие электромагнита пропорционально именно квадрату протекающего в обмотке тока, оказалось удобным на основе этого механизма строить стрелочные приборы так называемой электромагнитной системы, измеряющие эффективное значение тока ($I_{эфф}$). Опознать такие измерители можно по знаку (рис. 9.4, б) в нижней части шкалы. Электромагнитные вольтметры и амперметры широко распространены в энергетике, где их недостатки — низкая чувствительность и ограниченный частотный диапазон — не имеют большого значения. А нелинейная шкала (она сжата в начале и сильно растянута в конце) часто бывает даже удобнее — если измеряемое напряжение близко к предельному для вольтметра, то незначительные его изменения заметнее.

Измеряя переменные напряжение или ток, изменяющиеся по заранее известному закону, производить сложные вычисления в реальном времени вовсе не обязательно. Зная закон, это можно выполнить заранее. Известно, например, что действующее значение величины, изменяющейся по синусоиде, равно $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ ее амплитуды. Поэтому шкалу вольтметра, измеряющего амплитуду синусоидального напряжения, можно проградуировать так, что он будет показывать эффективное значение. Подобным образом построены многие ламповые и пришедшие им на смену полупроводниковые электронные высокочастотные вольтметры и милливольтметры, у которых амплитудный детектор смонтирован в выносном пробнике.

Часто вместо эффективного измеряют другое значение переменного напряжения — *средневыпрямленное* — постоянную составляющую несглаженного пульсирующего напряжения или тока на выходе двуполупериодного выпрямителя ($U_{ср.выпр}$ или $I_{ср.выпр}$). Оно равно $2/\pi \approx 0,637$ амплитуды синусоиды, что в 1,11 раза меньше ее эффективного значения. Подавляющее большинство универсальных низкочастотных измерительных приборов (авометров, мультиметров) показывают не эффективное, а именно средневыпрямленное значение переменного напряжения (тока), умноженное на этот поправочный коэффициент.

На шкалу стрелочных приборов такого типа обычно наносят знак (рис. 9.4, в), символизирующий магнитоэлектрический измерительный механизм, оснащенный полупроводниковым выпрямителем. Схема выпрямителя, примененного в ампервольтметре Ц4312, изображена на рис. 9.5. Трансформатор T_1 устраняет влияние постоянной составляющей измеряемой величины на результат (если, конечно, эта составляющая невелика и не вызывает

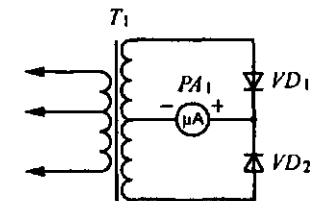


Рис. 9.5. Схема двухполупериодного выпрямителя с трансформатором

насыщения магнитопровода трансформатора). При измерениях сопротивления и постоянного тока и напряжения микроамперметр PA , отключен от выпрямителя не показанными на схеме контактами переключателя пределов измерения.

Диоды VD_1 , VD_2 — германиевые, имеющие меньшую, по сравнению с кремниевыми, нелинейность прямой ветви вольт-амперной характеристики. Тем не менее шкала переменного напряжения (тока) у рассматриваемого прибора, как и у других выпрямительных, заметно не линейна. Чтобы было удобнее учесть влияние нелинейности выпрямителя, иногда предусматривают даже две шкалы переменного напряжения: одну — для малых значений (менее 1...3 В), вторую — для больших.

Очень простой выпрямитель измеряемого переменного напряжения применяют в портативном цифровом мультиметре М-830 и ему подобных. Его схема показана на рис. 9.6. Здесь PV_1 — АЦП мультиметра, выполненный на микросхеме ICL7106 (аналогичная отечественная — К572ПВ5), который действует по принципу двойного интегрирования, выводя на ЖК индикатор среднее значение поданного на вход напряжения. Выпрямитель на диоде VD_1 — однополупериодный, постоянная составляющая на его выходе вдвое меньше средневыпрямленного значения. Необходимой коррекции показаний достигают подключением катода диода к точке соединения резисторов R_1 и R_2 .

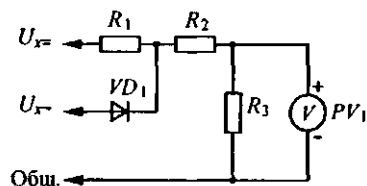


Рис. 9.6. Схема однополупериодного выпрямителя

Допустимое обратное напряжение (1000 В) диода 1N4007 обусловило ограничение верхнего предела измерения переменного напряжения значением 750 В, хотя остальные узлы мультиметра позволяют вести отсчет до 1999 В. Никаких мер по устранению погрешности, вносимой нелинейностью диода, не принято, хотя абсолютное значение этой погрешности — несколько десятых долей вольта — превышает цену единицы младшего разряда индикатора (0,1 В) на пределе измерения «200 В». Более

чувствительные пределы измерения просто не предусмотрены. На достоверность показаний такого прибора, особенно при измерении переменного напряжения менее 10...20 В и частотой выше нескольких килогерц, рассчитывать не стоит.

Следует еще раз напомнить, что показания приборов, проградуированных в эффективных, но фактически измеряющих совсем другие значения (а это подавляющее большинство всех применяемых в быту и радиодлюбительской практике приборов), справедливы только для синусоидальных напряжения и тока.

Для характеристики формы периодических сигналов введены два параметра: коэффициент амплитуды $k_a = I_{ампл}/I_{эфф}$ и коэффициент формы $k_\phi = I_{эфф}/I_{ср.выпр}$.

При синусоидальной форме сигнала рассмотренные значения составляют:

$$I_{ср.выпр} = (2/\pi)I_{ампл}; \quad I_{эфф} = (1/\sqrt{2})I_{ампл}; \quad k_a = \sqrt{2} \approx 1,41;$$

$$k_\phi = \pi/(2\sqrt{2}) \approx 1,11.$$

Для напряжения переменного электрического сигнала используются те же характеризующие значения, что и для тока, — амплитудное $U_{ампл}$, среднее $U_{ср}$, эффективное $U_{эфф}$. При эффективном напряжении сети 220 В амплитудное напряжение составляет 311 В, средневыпрямленное — 198 В.

На практике электротехнику приходится встречаться с электрическими сигналами разнообразной формы. Рассмотрим некоторые из них.

Синусоидальное напряжение (рис. 9.7, а) при двухполупериодном выпрямлении (рис 9.7, б) сохраняет свое эффективное значение. При однополупериодном выпрямлении (рис. 9.7, в) эффективное значение напряжения уменьшается в $\sqrt{2}$ раз.

Меандр (рис. 9.7, г, д). Однополярным меандром называют напряжение прямоугольной формы, которое одну половину периода равно своему максимальному значению, а другую — нулю (рис. 9.7, г). Среднее значение однополярного меандра равно половине амплитудного. Мощность, выделяемая током такой формы в нагрузку, вдвое меньше, чем мощность от постоянного тока, поэтому эффективное напряжение сигнала в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного. В случае двуполярного меандра (рис. 9.7, д) напряжения $U_{ампл}$, $U_{ср.выпр}$ и $U_{эфф}$ совпадают между собой.

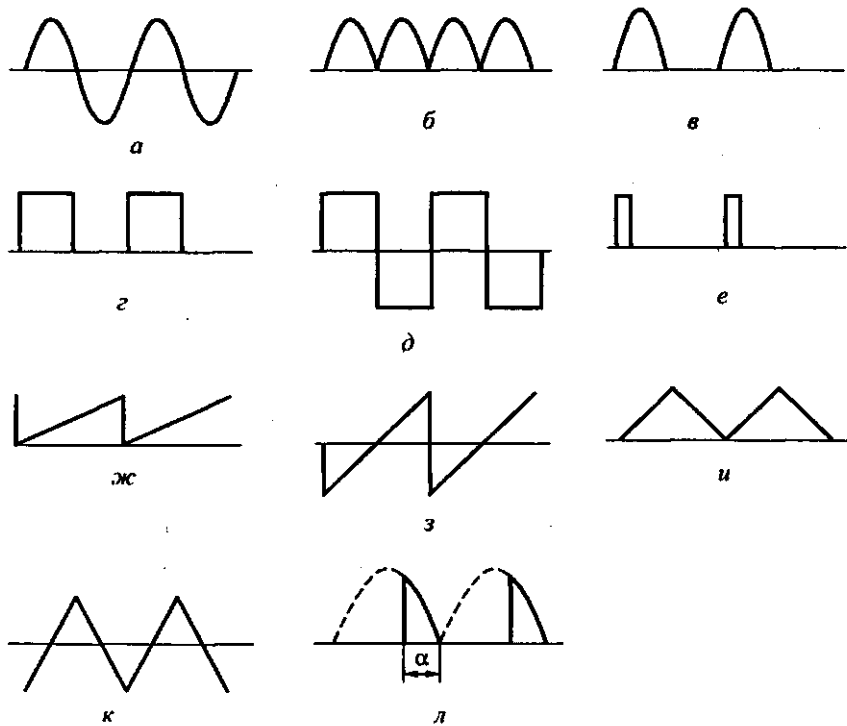


Рис. 9.7.

Последовательность прямоугольных импульсов (рис. 9.7, е) длительностью t с периодом повторения T . Для такого сигнала существует понятие «скважность», которая обычно обозначается буквой Q и определяется как отношение периода к длительности импульсов: $Q = T/t$. Поскольку ток сигнала такой формы действует в Q раз меньше время, чем постоянный ток, среднее значение сигнала в Q раз меньше амплитудного, а эффективное — в \sqrt{Q} раз.

Пилообразное напряжение (рис. 9.7, ж, з). Для него среднее значение (средневыпрямленное для двуполярного) равно половине амплитудного (площадь треугольника равна половине произведения основания на высоту). Для расчета эффективного значения следует определить площадь под параболой, описывающей зависимость квадрата напряжения от времени, оно получается в $\sqrt{3}$ раз меньше амплитудного.

То же соотношение справедливо и для сигнала треугольной формы (рис. 9.7, и), в том числе и двуполярного (рис. 9.7, к).

Напряжение на выходе фазоимпульсного регулятора (рис. 9.6, л). Его форму характеризует угол проводимости α , который может в общем случае меняться в пределах от 0 до π . Амплитудное значение напряжения такой формы составляет

$$U_{\text{ампл}} = U_{\text{ампл.с}} \sin \alpha \text{ для } \alpha \leq \pi/2, \quad U_{\text{ампл}} = U_{\text{ампл.с}} \sin \alpha \text{ для } \alpha > \pi/2,$$

среднее —

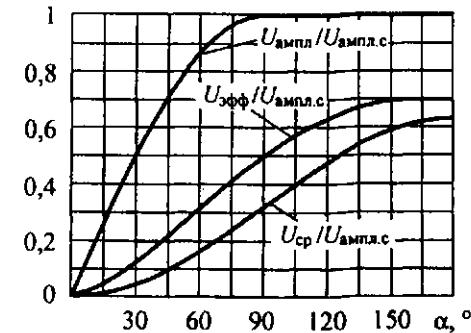
$$U_{\text{ср}} = U_{\text{ампл.с}} (1 - \cos \alpha) / \pi,$$

эффективное —

$$U_{\text{эфф}} = U_{\text{ампл.с}} \sqrt{(\alpha - (\sin \alpha) / 2) / (2\pi)},$$

где $U_{\text{ампл.с}}$ — амплитудное напряжение сети на входе регулятора, а угол α в последнюю формулу должен подставляться в радианах.

На рис. 9.8 приведены зависимости, описываемые этими формулами.

Рис. 9.8. Зависимость соотношений напряжений на выходе фазоимпульсного регулятора от угла отсечки α

В таблице приведены отношения среднего и эффективного значений к амплитудному, а также коэффициенты формы и амплитуды для рассмотренных сигналов.

Существуют электронные вольтметры, измеряющие истинное эффективное значение напряжения произвольной формы.

Таблица

Форма сигнала по рис. 9.7	$U_{\text{ср. выпр}}/U_{\text{max}}$	$U_{\text{эфф}}/U_{\text{max}}$	k_a	k_{ϕ}
а, б	$2/\pi \approx 0,637$	$1/\sqrt{2} \approx 0,707$	$\sqrt{2} \approx 1,41$	$\pi/(2\sqrt{2}) \approx 1,11$
в	$1/\pi \approx 0,318$	$1/2$	2	$\pi/2 \approx 1,57$
г	$1/2$	$1/\sqrt{2} \approx 0,707$	$\sqrt{2} \approx 1,41$	$\sqrt{2} \approx 1,41$
е	$1/Q$	$1/\sqrt{Q}$	\sqrt{Q}	\sqrt{Q}
ж, з, и, к	$1/2$	$1/\sqrt{3} \approx 0,577$	$\sqrt{3} \approx 1,73$	$2/\sqrt{3} \approx 1,15$

Импортные приборы такого класса можно опознать по надписи «True RMS» на передней панели. Соответствующую информацию об отечественных приборах можно найти только в их паспортах и технических описаниях. К ним относится милливольтметр ВЗ-48, принцип действия которого поясняет схема, изображенная на рис. 9.9. Через нагреватель вакуумного термопреобразователя U_1 протекает переменный ток, пропорциональный измеряемому напряжению и повторяющий его форму. Нагреватель термопреобразователя U_2 подключен последовательно с микроамперметром PA к выходу усилителя A_2 .

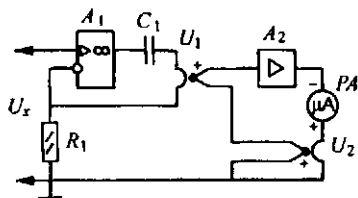


Рис. 9.9

Термопары преобразователей соединены встречно-последовательно и соединены с входом усилителя так, что он оказывается охваченным отрицательной ОС. Таким образом поддерживается равенство тока, текущего через микроамперметр, эффективному значению тока, текущего через нагреватель преобразователя U_1 .

Из-за тепловой инерции преобразователей время установления показаний милливольтметра довольно велико (4 с). Так как существенную погрешность вносит дрейф нуля усилителя посто-

янного тока A_1 , приняты меры к его снижению — усилитель выполнен по схеме «модулятор—демодулятор» (МДМ). Частотный диапазон измерений ограничен полосой пропускания усилителя A_1 .

Доверять показаниям подавляющего большинства вольтметров можно лишь, измеряя чисто синусоидальное напряжение, частота которого лежит в допустимых для используемого прибора пределах. В любом случае, прежде чем приступать к измерениям, нужно хорошенько обдумать, что именно необходимо измерить и что на самом деле покажет ваш вольтметр. Все, сказанное выше, в полной мере относится и к измерителям тока.

Микросхема AD736 фирмы Analog Devices является точным монолитным преобразователем переменного напряжения в эффективное значение с низким потреблением. При производстве микросхемы проводится лазерная подгонка, обеспечивающая базовую точность $\pm(0,3\% + 0,3 \text{ мВ})$ при синусоидальном входном сигнале. Микросхема также обеспечивает высокую точность для различных форм входного сигнала, включая импульсные последовательности произвольной скважности и выходное напряжение тиристорных регуляторов с фазовым управлением. Относительно невысокая стоимость и малые размеры позволяют использовать эту микросхему для конструирования общедоступных мультиметров и модернизации существующих измерительных приборов.

Эта микросхема определяет эффективное значение как переменного, так и постоянного напряжения или постоянного с любой амплитудой наложенных пульсаций. При необходимости, однако, можно измерять эффективное значение только переменной составляющей, добавив всего один конденсатор. Гарантируется относительная ошибка не более 2% от измеряемой величины.

Микросхема имеет выходной буферный усилитель, что обеспечивает большую гибкость при ее использовании. Она потребляет ток не более 200 мкА и оптимизирована для применения в портативных мультиметрах.

Возможны два варианта подачи входного сигнала на микросхему. Высокоомный вход имеет входное сопротивление более 10^{12} Ом, низкоомный — 8 кОм, однако низкоомный вход позволяет подавать входное напряжение большей амплитуды. Эти два входа могут использоваться для дифференциальной подачи сиг-

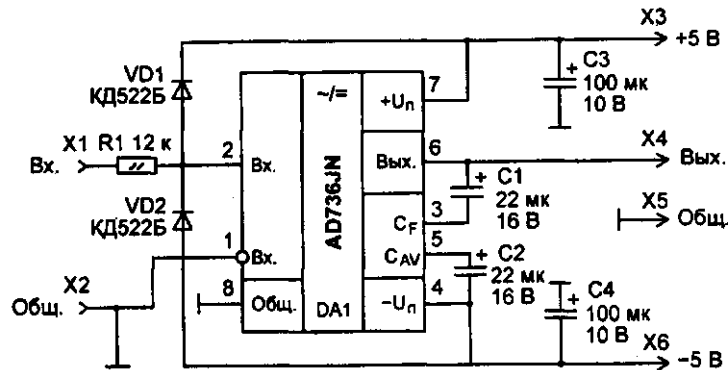


Рис. 9.10. Преобразователь напряжения любой формы в его эффективное значение

нала. На рис. 9.10 приведена практическая схема преобразования входного напряжения любой формы в его эффективное значение.

Контрольные вопросы

1. Для чего добиваются высокого входного сопротивления вольтметра?
2. Какие трудности возникают при измерении переменного напряжения?
3. Как достижения современной микроэлектроники упрощают процесс измерения переменного напряжения любой формы?

Глава 10

ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И КОМПОНЕНТОВ

10.1. Общие сведения

Сопротивление, емкость и индуктивность суть основные параметры электрических цепей, с измерением которых часто приходится встречаться на практике. Известно много методов их измерения, а приборостроительная промышленность выпускает для этой цели средства измерения широкой номенклатуры. Выбор того или иного метода измерения и измерительной аппаратуры зависит от вида измеряемого параметра, его значения, требуемой точности измерения, особенностей объекта измерения и т. п. Например, измерение сопротивлений твердых проводников, как правило, производится на постоянном токе, поскольку прибор для измерений в этом случае проще по конструкции и дешевле, чем аналогичный прибор для измерений на переменном токе. Однако измерение в средах, имеющих высокую влажность, или сопротивлений заземлений производится только на переменном токе, так как результат измерения на постоянном токе будет содержать большие погрешности из-за влияния электрохимических процессов.

10.2. Основные методы и средства измерения сопротивления электрической цепи постоянному току

Диапазон измеряемых на практике сопротивлений широк (от 10^{-8} до 10^{15} Ом), и его условно делят по значениям сопротивлений на малые (менее 10 Ом), средние (от 10 до 10^6 Ом) и боль-

шие (свыше 10^6 Ом), в каждой из которых измерение сопротивлений имеет свои особенности.

Сопротивление — параметр, проявляющийся только при прохождении в цепи электрического тока, поэтому измерения проводятся в работающем устройстве или используется измерительный прибор с собственным источником тока. Необходимо позаботиться о том, чтобы полученная электрическая величина правильно отражала только измеряемое сопротивление и не содержала излишней информации, которая воспринимается как погрешность измерения. Рассмотрим с этой точки зрения особенности измерения малых и больших сопротивлений.

При измерении малых сопротивлений, например обмоток трансформаторов или коротких проводов, через сопротивление пропускается ток, а возникшее на этом сопротивлении падение напряжения измеряется. На рис. 10.1 показана схема соединений при измерении сопротивления R_x короткого проводника. Последний подключается к источнику тока I посредством двух соединительных проводников с собственным сопротивлением R_n . В местах соединения этих проводников с измеряемым сопротивлением образуются переходные сопротивления контактов R_k . Значение R_n зависит от материала соединительного проводника, его длины и сечения, значение R_k — от площади соприкасающихся частей, их чистоты и силы сжатия. Таким образом, числовые значения R_n и R_k зависят от многих причин и определить их заранее трудно, но им можно дать примерную оценку. Если соединительные проводники выполнены коротким медным проводом с сечением в несколько квадратных милли-

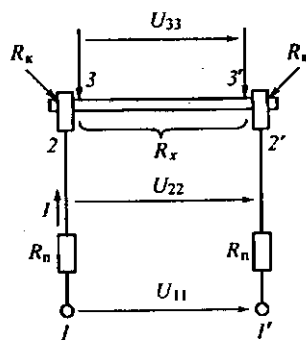


Рис. 10.1. Схема соединений при измерении сопротивления короткого проводника

метров, а контактные сопротивления имеют чистую и хорошо сжатую поверхность, то для приближенных оценок можно принять $2(R_n + R_k) \approx 0,01$ Ом.

В качестве измеряемого напряжения в схеме рис. 10.1 можно использовать U_{11} , U_{22} или U_{33} . Если выбрано U_{11} , то результат измерения отражает полное сопротивление цепи между зажимами 1—1':

$$R_{11} = U_{11}/I = R_x + 2(R_n + R_k).$$

Здесь второе слагаемое представляет собой погрешность, относительное значение которой δ в процентах равно:

$$\delta = \frac{R_{11} - R_x}{R_x} 100 = 2 \frac{R_n + R_k}{R_x} 100.$$

При измерении малых сопротивлений эта погрешность может быть большой. Например, если принять $2(R_n + R_k) \approx 0,01$ Ом, а $R_x = 0,1$ Ом, то $\delta \approx 10$ %. Погрешность δ уменьшится, если в качестве измеряемого напряжения выбрать U_{22} :

$$R_{22} = U_{22}/I = R_x + 2R_k.$$

Здесь сопротивление подводящих проводов исключается из результата измерения, но остается влияние R_k .

Результат измерения будет полностью свободен от влияния R_n и R_k , если в качестве измеряемого напряжения выбрать U_{33} .

Схему включения R_x в таком случае называют четырехзажимной: первая пара зажимов 2—2' предназначена для подвода тока и называется токовыми зажимами, вторая пара зажимов 3—3' — для съема напряжения с измеряемого сопротивления и называется потенциальными зажимами.

Применение токовых и потенциальных зажимов при измерении малых сопротивлений является основным приемом для устранения влияния соединительных проводов и переходных сопротивлений на результат измерения.

При измерении больших сопротивлений, например сопротивлений изоляторов, поступают так: к объекту прикладывают напряжение, а возникший ток измеряют и по нему судят о значении измеряемого сопротивления.

При испытании диэлектриков следует иметь в виду, что их электрическое сопротивление зависит от многих условий — ок-

ружающей температуры, влажности, утечек по грязной поверхности, значения испытательного напряжения, продолжительности его действия и т. д.

Измерение сопротивления электрической цепи постоянному току на практике производится наиболее часто методом амперметра и вольтметра, логометрическим или мостовым методом.

Метод амперметра и вольтметра. Этот метод основан на раздельном измерении тока I в цепи измеряемого сопротивления R_x и напряжения U на его зажимах и последующем вычислении значения R_x по показаниям измерительных приборов:

$$R_x = U/I.$$

Обычно ток I измеряют амперметром, а напряжение U — вольтметром, этим объясняется название метода. При измерении высокоомных сопротивлений, например сопротивления изоляции, ток I мал и его измеряют миллиамперметром, микроамперметром или гальванометром. При измерении низкоомных сопротивлений, например куска провода, оказывается малым значение U и для его измерения применяют милливольтметры, микровольтметры или гальванометры. Однако во всех этих случаях метод измерения сохраняет свое наименование — амперметра и вольтметра. Возможные схемы включения приборов показаны на рис. 10.2, а, б.

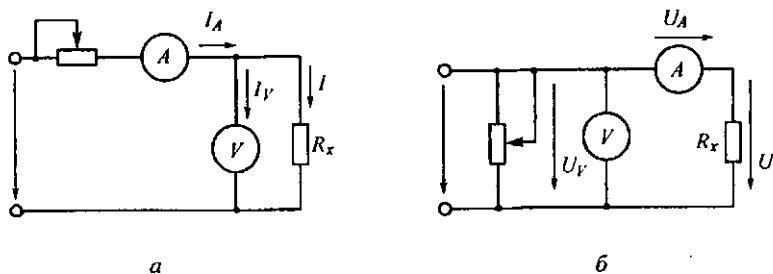


Рис. 10.2. Схемы для измерений малых (а) и больших (б) сопротивлений методом амперметра и вольтметра

Достоинство метода заключается в простоте его реализации, недостаток — в сравнительно невысокой точности результата измерения, которая ограничена классом точности применяемых измерительных приборов и методической погрешностью. Последняя обусловлена влиянием мощности, потребляемой изме-

рительными приборами в процессе измерения, другими словами — конечным значением собственных сопротивлений амперметра R_A и вольтметра R_V .

Выразим методическую погрешность через параметры схемы.

В схеме рис. 10.2, а вольтметр показывает значение напряжения на зажимах R_x , а амперметр — сумму токов $I_V + I$. Следовательно, результат измерения R , вычисленный по показаниям приборов, будет отличаться от R_x :

$$R = \frac{U}{I + I_V} = \frac{U}{U/R_x + U/R_V} = \frac{R_x}{1 + R_x/R_V}.$$

Относительная погрешность измерения в процентах

$$\delta = \frac{R - R_x}{R_x} 100 = -\frac{R_x/R_V}{1 + R_x/R_V} 100 \approx -\frac{R_x}{R_V} 100.$$

Здесь приближенное равенство справедливо, так как при правильной организации эксперимента предполагается выполнение условия $R_V \gg R_x$.

В схеме рис. 10.2, б амперметр показывает значение тока в цепи с R_x , а вольтметр — сумму падений напряжений на R_x и амперметре U_A . Учитывая это, можно по показаниям приборов вычислить результат измерения:

$$\frac{U + U_A}{I_A} = \frac{I_A R_x + I_A R_A}{I_A} = R_x + R_A.$$

Относительная погрешность измерения в процентах в данном случае равна:

$$\delta = \frac{R - R_x}{R_x} 100 = \frac{R_A}{R_x} 100.$$

Из полученных выражений для относительных погрешностей видно, что в схеме рис. 10.2, а на методическую погрешность результата измерения оказывает влияние только сопротивление R_V ; для снижения этой погрешности необходимо обеспечить условие $R_x \ll R_V$. В схеме рис. 10.2, б на методическую погрешность результата измерения оказывает влияние только R_A ; снижение этой погрешности достигается выполнением условия $R_x \gg R_A$. Таким образом, при практическом использовании данного метода мож-

но рекомендовать правило: измерение малых сопротивлений следует производить по схеме рис. 10.2, а; при измерении больших сопротивлений предпочтение следует отдавать схеме рис. 10.2, б.

Методическую погрешность результата измерения можно исключить путем введения соответствующих поправок, но для этого необходимо знать значения R_A и R_V . Если они известны, то из результата измерения по схеме рис. 10.2, б следует вычесть значение R_A ; в схеме рис. 10.2, а результат измерения отражает параллельное соединение сопротивлений R_x и R_V , поэтому значение R_x вычисляется по формуле

$$R_x = \frac{R}{1 - R/R_V}.$$

Если при данном методе применить источник питания с заранее известным напряжением, то необходимость измерения напряжения вольтметром отпадает, а шкалу амперметра можно сразу отградуировать в значениях измеряемого сопротивления. На этом принципе основано действие многих моделей выпускаемых промышленностью омметров непосредственной оценки. Упрощенная принципиальная схема такого омметра показана на рис. 10.3. Схема содержит источник ЭДС \mathcal{E} , добавочный резистор R_d и амперметр (обычно микроамперметр) A . При подключении к зажимам схемы измеряемого сопротивления R_x в цепи возникает ток I , под действием которого подвижная часть амперметра поворачивается на угол α , а его указатель отклоняется на a делений шкалы:

$$a = \frac{\mathcal{E}}{C_I} \frac{1}{R_d + R_A + R_x},$$

где C_I — цена деления (постоянная) амперметра; R_d — сопротивление амперметра.

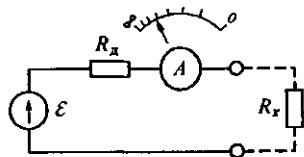


Рис. 10.3. Принципиальная схема омметра с последовательным включением измеряемого сопротивления

Как видно из этой формулы, шкала омметра нелинейна, и стабильность градуировочной характеристики требует обеспечения стабильности всех величин, входящих в уравнение. Между тем источник питания в такого рода приборах обычно реализуется в виде сухого гальванического элемента, ЭДС которого падает по мере его разряда. Ввести поправку на изменение \mathcal{E} , как видно из уравнения, можно путем соответствующей регулировки C_I или R_d . В некоторых омметрах C_I регулируется путем изменения индукции в зазоре магнитной системы амперметра с помощью магнитного шунта.

В этом случае поддерживается постоянство отношения \mathcal{E}/C_I и градуировочная характеристика прибора сохраняет свое значение независимо от значения \mathcal{E} . Регулировка C_I производится так: зажимы прибора, к которым подключается R_x , замыкаются накоротко ($R_x = 0$) и регулировкой положения магнитного шунта добиваются установки указателя амперметра на нулевую отметку шкалы; последняя расположена на крайней правой точке шкалы. На этом регулировка заканчивается, и прибор готов к измерению сопротивлений.

В комбинированных приборах ампервольтметрах регулировка C_I недопустима, так как это приведет к нарушению градуировки прибора в режимах измерений токов и напряжений. Поэтому в таких приборах поправку на изменение ЭДС \mathcal{E} вводят регулировкой сопротивления переменного добавочного резистора R_d . Процедура регулировки та же, что и в приборах с регулируемой магнитным шунтом магнитной индукцией в рабочем зазоре. В этом случае градуировочная характеристика прибора изменяется, что приводит к дополнительным методическим погрешностям. Однако параметры схемы выбираются так, чтобы указанная погрешность была небольшой.

Возможен другой способ подключения измеряемого сопротивления — не последовательно с амперметром, а параллельно ему (рис. 10.4). Зависимость между R_x и углом отклонения подвижной части в данном случае также нелинейна, однако нулевая отметка на шкале расположена слева, а не справа, как это имеет место в предыдущем варианте. Такой способ подключения измеряемого сопротивления применяется при измерении малых сопротивлений, так как позволяет ограничить потребляемый ток.

Электронный омметр может быть реализован на базе усилителя постоянного тока с большим коэффициентом усиления, на-

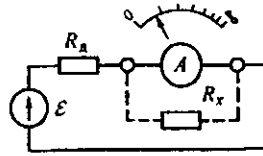


Рис. 10.4. Принципиальная схема омметра с параллельным включением измеряемого сопротивления

пример, на операционном усилителе (ОУ). Схема такого прибора показана на рис. 10.5. Его главное достоинство — линейность шкалы для отсчета результатов измерений. ОУ охвачен отрицательной обратной связью через измеряемый резистор R_x , питающее стабилизированное напряжение U_0 подано на вход усилителя через вспомогательный резистор R_1 , а к выходу подключен вольтметр PV . При большом собственном коэффициенте усиления ОУ, низком выходном и высоком входном его сопротивлениях, выходное напряжение ОУ есть:

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_x}{R_1} \quad (10.1)$$

и для заданных значений U_0 и R_1 , шкалу измерительного прибора можно проградуировать в единицах измерения сопротивления для отсчета значения R_x , причем она будет линейной в пределах изменения напряжения от 0 до $U_{\text{вых max}}$ — максимального напряжения на выходе ОУ.

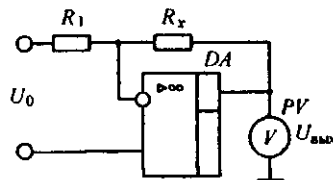


Рис. 10.5. Электронный омметр

Из формулы (10.1) видно, что максимальное значение измеряемого сопротивления есть:

$$R_{x \text{ max}} = -R_1 \frac{U_{\text{вых max}}}{U_0}. \quad (10.2)$$

Для изменения пределов измерений переключают значения сопротивления резистора R_1 или напряжения U_0 .

При измерении низкоомных сопротивлений можно в схеме поменять местами измеряемый и вспомогательный резисторы. Тогда выходное напряжение будет обратно пропорционально величине R_x :

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_1}{R_x}. \quad (10.3)$$

Следует заметить, что данный способ включения не позволяет измерять низкоомные сопротивления менее десятков Ом, поскольку внутреннее сопротивление источника опорного напряжения, которое составляет доли или единицы Ом, оказывается включенным последовательно с измеряемым сопротивлением и вносит существенную погрешность в измерения. Кроме того, в этом случае теряется основное преимущество прибора — линейность отсчета измеряемого сопротивления, а сдвиг нуля и входной ток усилителя могут вносить существенные ошибки.

Рассмотрим специальную схему для измерения малых сопротивлений, свободную от этих недостатков (рис. 10.6). Измеряемый резистор R_x вместе с резистором R_3 образует делитель напряжения на входе ОУ. Напряжение на выходе схемы в этом случае равно:

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_2}{R_1} \frac{R_x}{R_3 + R_x}.$$

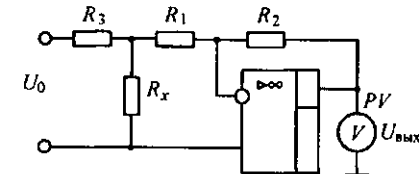


Рис. 10.6. Электронный омметр для измерения малых сопротивлений

Если выбрать $R_3 \gg R_x$, то выражение упростится и шкала прибора будет линейной относительно R_x :

$$U_{\text{вых}} = -U_0 \frac{R_2}{R_1} \frac{R_x}{R_3}. \quad (10.4)$$

Электронный омметр не позволяет измерять реактивные сопротивления, так как включение измеряемой индуктивности или

емкости в схему изменит фазовые соотношения в цепи обратной связи ОУ и формулы (10.1)—(10.4) станут неверными. Кроме того, ОУ может потерять устойчивость, и в схеме возникнет генерация.

Логометрический метод. Этот метод основан на измерении отношения двух токов I_1 и I_2 , один из которых протекает по цепи с измеряемым сопротивлением, а другой — по цепи, сопротивление которой известно. Оба тока создаются одним источником напряжения, поэтому нестабильность последнего практически не влияет на точность результата измерения. Принципиальная схема омметра на основе логометра представлена на рис. 10.7. Схема содержит измерительный механизм на основе логометра, магнетоэлектрической системы с двумя рамками, одна из которых при протекании тока создает отклоняющий, а другая — возвращающий момент. Измеряемое сопротивление может быть включено последовательно (рис. 10.7, а) или параллельно (рис. 10.7, б) относительно рамки измерительного механизма.

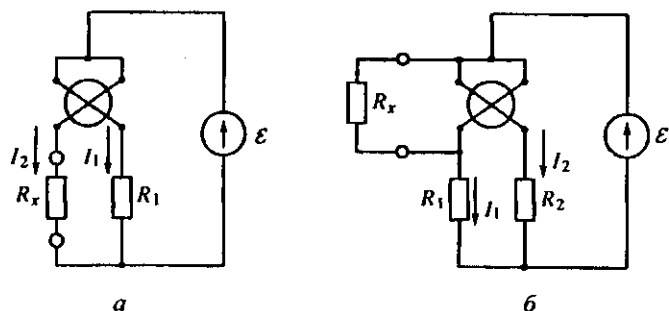


Рис. 10.7. Схемы омметров на основе логометра для измерения больших (а) и малых (б) сопротивлений

Последовательное включение применяется при измерении средних и больших сопротивлений, параллельное — при измерении малых сопротивлений. Рассмотрим работу омметра на примере схемы рис. 10.7, а. Если пренебречь сопротивлением обмоток рамок логометра, то угол поворота подвижной части α зависит только от отношения сопротивлений:

$$\alpha = f\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = f\left(\frac{R_x + R_0}{R_1 + R_0}\right),$$

где I_1 и I_2 — токи через рамки логометра; R_0 — сопротивление рамок логометра; R_1 — известное сопротивление; R_x — измеряемое сопротивление.

Сопротивлением резистора R_1 задается диапазон измеряемых омметром сопротивлений. Напряжение питания логометра влияет на чувствительность его измерительного механизма к изменению измеряемого сопротивления и не должно быть ниже определенного уровня. Обычно напряжение питания логометров устанавливают с некоторым запасом для того, чтобы его возможные колебания не влияли на точность результата измерения.

Выбор напряжения питания и способ его получения зависят от назначения омметра и диапазона измеряемых сопротивлений: при измерении малых и средних сопротивлений применяют сухие батареи, аккумуляторы или источники питания от промышленной сети, при измерении больших сопротивлений — специальные генераторы с напряжением 100, 500, 1000 В и более.

Логометрический метод применен в мегаомметрах ЭС0202/1Г и ЭС0202/2Г с внутренним электромеханическим генератором напряжения. Они применяются для измерения больших ($10^5 \dots 10^9$ Ом) электрических сопротивлений, для измерения сопротивления изоляции электрических проводов, кабелей, разъемов, трансформаторов, обмоток электрических машин и других устройств, а также для измерения поверхностных и объемных сопротивлений изоляционных материалов.

При измерении с помощью мегаомметра сопротивления электрической изоляции следует учитывать температуру и влажность окружающего воздуха, от значения которых зависят возможные неконтролируемые утечки тока.

Цифровые омметры применяются в научно-исследовательских, поверочных и ремонтных лабораториях, на промышленных предприятиях, изготавливающих резисторы, т. е. там, где требуется повышенная точность измерений. В этих омметрах предусматривается ручное, автоматическое и дистанционное управление диапазонами измерений. Вывод информации о диапазоне измерений, числовом значении измеряемой величины производится в параллельном двоично-десятичном коде.

Структурная схема омметра Ш306-2 представлена на рис. 10.8. Омметр включает в себя блок преобразования 1, блок индикации 10, блок управления 9, блок питания, микроЭВМ 4 и блок вывода результатов 11.

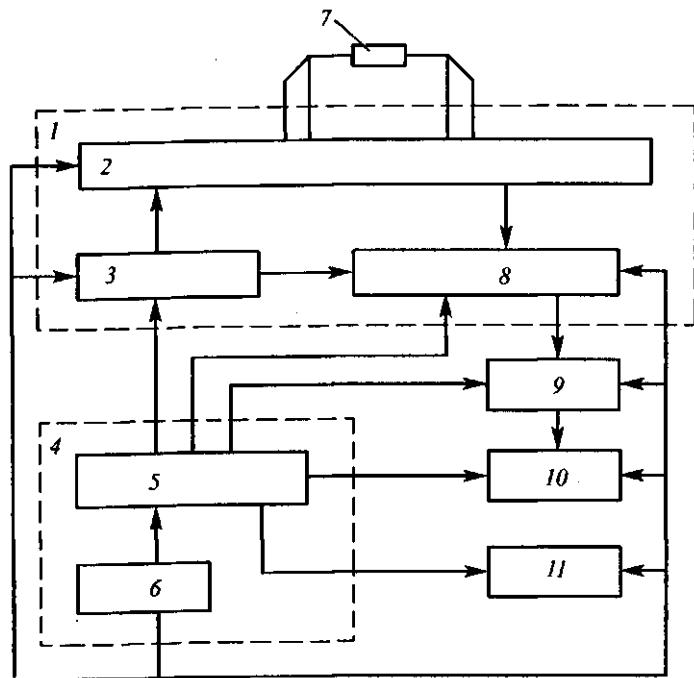


Рис. 10.8. Структурная схема омметра типа ШЗ06-2

Блок преобразования содержит входной масштабный преобразователь 2, интегратор 8 и блок управления 3. Измеряемый резистор 7 подключается в цепь обратной связи операционного усилителя. Через измеряемый резистор в зависимости от такта измерения пропускается ток, соответствующий диапазону измерения, включая дополнительный ток, вызванный смещением нуля операционных усилителей. С выхода масштабного преобразователя напряжение подается на вход интегратора, выполненного по принципу многотактного интегрирования с измерением величины разрядного тока.

Алгоритм управления обеспечивает работу масштабного преобразователя и интегратора, а также связь с микроЭВМ.

В блоке управления происходит заполнение интервалов времени тактовыми импульсами, поступающими затем на входы четырех счетчиков старших и младших разрядов. Информация, полученная на выходах счетчиков, считывается в оперативном запоминающем устройстве (ОЗУ) микроЭВМ.

Съем информации с блока управления о результате измерения и режиме работы омметра, обработка и приведение данных к виду, необходимому для индикации, математическая обработка результата, вывод данных во вспомогательное ОЗУ блока управления, управление работой омметра и другие функции возложены на микропроцессор 5, расположенный в блоке микроЭВМ. В этом же блоке находятся стабилизаторы 6 для питания устройств омметра.

Омметр построен на микросхемах повышенной степени интеграции.

Технические характеристики

Диапазон измерений $10^{-4} \dots 10^9$ Ом. Класс точности для пределов измерений: 0,01/0,002 для 100 Ом; 0,005/0,001 для 1,10, 100 кОм; 0,005/0,002 для 1 МОм; 0,01/0,005 для 10 МОм; 0,2/0,04 для 100 МОм; 0,5/0,1 для 1 Гом (в числителе даны значения в режиме без накопления данных, в знаменателе — с накоплением).

Число десятичных разрядов: 4,5 в диапазонах с верхним пределом 100 МОм, 1 Гом; 5,5 в остальных диапазонах в режиме без суммирования, 6,5 в режиме с суммированием.

Портативные цифровые мультиметры, например серии M83 производства Mastech могут использоваться как омметры класса точности 1.0 или 2.5.

10.3. Использование мультиметров в режиме омметра для оценки работоспособности электро-радиотехнических компонентов

Многие устройства, с которыми приходится иметь дело электротехнику (источники бесперебойного питания, инверторы, зарядные устройства) собраны с применением изделий электронной промышленности. Чаще всего они выходят из строя из-за неисправностей в силовых цепях, где протекают большие токи или присутствует высокое напряжение. Маломощные схемы управления силовыми цепями выходят из строя редко, и для их ремонта требуется квалифицированный специалист, поэтому бу-

дуг рассмотрены приемы определения работоспособности только мощных полупроводниковых приборов.

Как правило, портативный мультиметр всегда находится под рукой электротехника. Имея необходимые навыки, можно оценить работоспособность некоторых электро-радиотехнических компонентов с их помощью, не прибегая к использованию дорогостоящей специализированной аппаратуры.

Выявление неполадок диодов и стабилитронов. Исправные полупроводниковые диоды и стабилитроны обладают односторонней проводимостью, а большинство неисправных — двухсторонней проводимостью. Возможен также внутренний обрыв.

Для выявления неполадок диода один из его выводов отпаивают от печатной схемы и, пользуясь омметром, проверяют наличие односторонней проводимости диода. При прямом включении омметра положительный полюс внутренней батареи омметра подключают к аноду диода.

В цифровых мультиметрах в режиме испытания $p-n$ -переходов используется ток порядка 1 мА, а на дисплее отображается падение напряжения на этом переходе в милливольтках. У исправных германиевых диодов падение напряжения составляет 100...200 мВ, у кремниевых — около 600 мВ (рис. 10.9, а). При обратном подключении исправного перехода дисплей показывает переполнение счетчика (рис. 10.9, б).

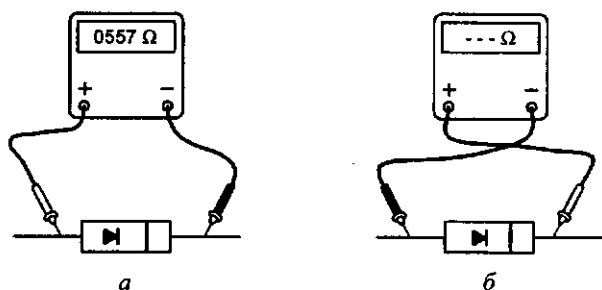


Рис. 10.9

При пробое диода прямое сопротивление будет почти такое же, как обратное. При обрыве цепи в диоде как прямое, так и обратное сопротивление будет бесконечно большим.

Выявление неполадок стабилитронов выполняют, либо отделяя стабилитрон от платы, либо отсоединив его. В первом

случае включают ток питания платы и измеряют рабочее напряжение на стабилитроне: если оно окажется в пределах нормального значения для данного типа стабилитрона, то он исправен. Во втором случае, как и при проверке диодов, измеряют сопротивление при прямом и обратном приложении напряжения. При проверке некоторых кремниевых стабилитронов имеют в виду, что если приложенное обратное напряжение не превышает напряжения стабилизации, то свойства стабилитрона ничем не отличаются от свойств любого диода.

Выявление неполадок биполярных транзисторов. В биполярном транзисторе $p-n$ -переходы являются аналогами переходов обычных диодов. В транзисторе типа $p-n-p$ имеются как бы два последовательно соединенных диода, у которых катоды, т. е. n -области переходов, соединены вместе и подключены к выводу базы, а аноды подключены к выводам эмиттера и коллектора. В транзисторах типа $n-p-n$ с базой соединены аноды диодов.

Если в исправном транзисторе типа $p-n-p$ к базе подключить положительный полюс внутренней батареи омметра, то переходы запираются, и омметр покажет большое сопротивление между базой и коллектором или базой и эмиттером. Если же к базе подключают отрицательный полюс внутренней батареи омметра, то он показывает малое сопротивление относительно эмиттера или коллектора. Для транзисторов типа $n-p-n$ полярности подключаемого напряжения будут обратными.

Измеряя сопротивление, нельзя допускать перегрузки переходов током, так как она может привести к выходу транзистора из строя. Наиболее безопасно применять омметры с внутренним источником напряжения 1,5 В, а в многопредельных омметрах использовать шкалы с пределами $\times 100$ или $\times 1000$ Ом.

Если под рукой нет принципиальной схемы и неизвестно, какой из выводов коллектор, а какой — база, воспользуйтесь цифровым тестером с функцией контроля параметров полупроводниковых диодов. Прежде всего проверьте, есть ли маркировка на корпусе транзистора или обозначение выводов на монтажной плате. Проверьте по справочнику тип транзистора, каковы максимальные значения рабочих напряжений и для какого типа цепей он предназначен.

Если же на корпусе транзистора нет ни маркировки, ни обозначений его выводов, попытайтесь определить вывод базы, используя функцию проверки параметров полупроводниковых

диодов цифрового тестера. Относительно вывода базы должны прозваниваться в прямом включении оба перехода транзистора база—эмиттер и база—коллектор. Сначала к выводу базы подключается положительный щуп цифрового тестера. Измеренные величины сопротивлений между выводами база—коллектор и база—эмиттер должны быть примерно одинаковыми, однако, как правило, значение сопротивления между выводами базы и эмиттера для исправного транзистора несколько выше. Например, при проверке транзистора 2SC5353, используемого в качестве ключевого в схеме полумостового инвертера, сопротивление база—коллектор составило 609 Ом. Сопротивление, измеренное между выводами базы и эмиттера, оказалось 667 Ом (рис. 10.10).

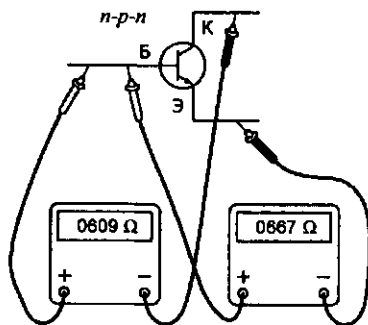


Рис. 10.10

Выявление неполадок полевых транзисторов. Наиболее часто повреждение полевого транзистора возникает в результате электрического пробоя изолятора затвора.

Возникшие токи могут вызвать полный отказ транзистора (короткое замыкание между затвором и электродами стока и истока, обрыв цепи любого электрода) или частичную утрату его работоспособности в виде ухудшения электрических параметров (возрастание тока затвора, уменьшение тока стока и крутизны характеристики, увеличение порогового напряжения). Последняя группа повреждений проявляется как результат нарушения структуры прибора: образование локальных областей пробоя, перегорание дорожек металлизации.

При ремонте аппаратов с применением полевых транзисторов часто возникает задача проверки этих транзисторов. Чаще всего приходится иметь дело с вышедшими из строя мощными

полевыми транзисторами импульсных блоков питания и аналоговых им.

За редким исключением в современных схемах используются транзисторы с изолированным затвором и индуцированным каналом *n*-типа. Это означает, что проводящий участок (канал) между истоком и стоком появляется только при наличии на затворе положительного относительно истока потенциала.

Полевой транзистор имеет три вывода: затвор (*Gate*), сток (*Drain*), исток (*Source*). Расположение этих выводов на транзисторах разных производителей может быть различным. Чаще всего выводы транзистора можно определить по маркировке на плате ремонтируемого аппарата (обычно выводы маркируются заглавными латинскими буквами *G*, *D*, *S*). Если такой маркировки нет, то желательно воспользоваться справочными данными.

Очень важным моментом при проверке полевых транзисторов является соблюдение правил безопасности для предотвращения выхода из строя транзистора во время проверки. Дело в том, что полевые транзисторы, особенно старых выпусков, очень чувствительны к статическому электричеству. Желательно надеть на руку заземляющий браслет для снятия с себя накопленного статического электрического заряда.

У всех современных мощных полевых транзисторов между стоком и истоком имеется паразитный встроенный диод V_{D_n} (это связано с технологией производства), поэтому при подаче на исток положительного, а на сток отрицательного напряжения мультиметр покажет сопротивление порядка 600 Ом (рис. 10.11, *а*). Всегда помните о возможности наличия такого диода и не примите его наличие за неисправность транзистора. Убедиться в наличии диода достаточно просто: нужно поменять полярность тестового прибора и он должен показать бесконечное сопротивление между стоком и истоком (рис. 10.11, *б*), а если этого не произошло, то, скорее всего, транзистор пробит.

Если при проверке приложить «+» измерительного прибора к затвору *Z* транзистора, а «-» к истоку *I* (для транзисторов с *n*-каналом), то произойдет заряд емкости затвора, затвор приобретет положительный потенциал относительно истока, возникнет проводящий канал, и транзистор откроется. При проверке транзистора лучше всего пользоваться цифровым мультиметром с переключателем пределов измерений, установленным на значок диода (надпись «2k» шкалы сопротивлений). Между щупами

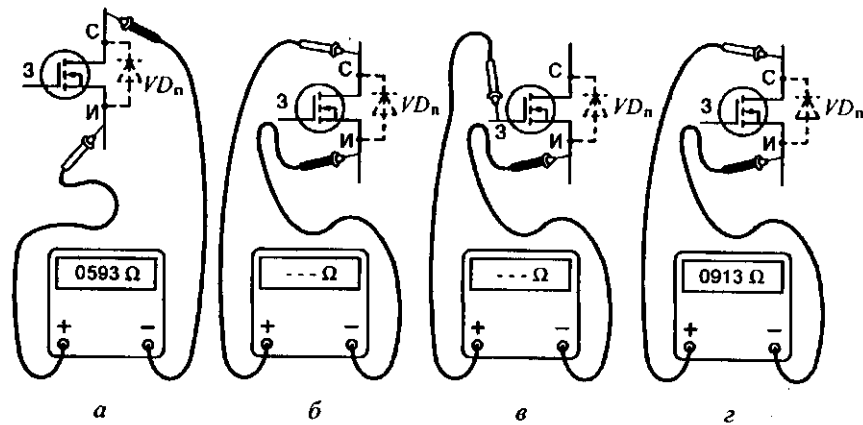


Рис. 10.11. Показания омметра при подключении его к мощному полевому транзистору

мультиметра при таком положении переключателя имеется напряжение около 3 В, которое, как правило, превышает пороговое напряжение современных транзисторов. Если далее измерить сопротивление между стоком С и истоком И, то прибор покажет сопротивление, которое зависит от многих причин, но никак не бесконечное сопротивление (рис. 10.11, г), транзистор будет открыт до тех пор, пока не разрядится емкость затвора, по скорости роста сопротивления исток—сток можно судить о качестве изолятора затвора.

Многие неопытные ремонтники могут принять это за неисправность. Поэтому перед прозвонкой участка сток—исток замкните накоротко все ножки транзистора, это приведет к разряду емкости затвора. После этого при измерении сопротивления сток—исток оно должно быть бесконечным (рис. 10.11, в). Если этого не произошло — значит, транзистор неисправен.

Таким образом, имея под рукой обычный омметр, можно легко и быстро произвести проверку мощного полевого транзистора.

Выявление неполадок конденсаторов. К отказам конденсаторов относят пробой, потерю емкости, увеличение тока утечки.

Используя омметр или мультиметр со стрелочным измерительным механизмом, можно применить *метод баллистического гальванометра* (рис. 10.12). Для этого мультиметр включают на предел измерения сопротивления и щупами дотрагиваются до вы-

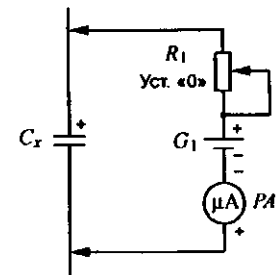


Рис. 10.12. Баллистический гальванометр

водов предварительно разряженного конденсатора. Ток зарядки вызовет кратковременное отклонение стрелки, тем большее, чем больше емкость конденсатора. Пробитый конденсатор имеет сопротивление, близкое к нулевому, а конденсатор с оборванным выводом не вызовет никакого отклонения стрелки омметра. При проверке оксидных конденсаторов надо соблюдать полярность, предварительно определив, на каком из выводов мультиметра присутствует плюсовое напряжение (полярность выводов мультиметра в режиме измерения сопротивлений может и не совпадать с полярностью в режиме измерения токов или напряжений).

На пределе «Омы» удастся проверять конденсаторы емкостью в тысячи микрофард.

На пределе «кОм×1» можно проверять конденсаторы емкостью в сотни микрофард, на пределе «кОм×10» — в десятки микрофард, на пределе «кОм×100» — в единицы микрофард и, наконец, на пределе «кОм×1000» или «МОм» — в доли микрофард. Но конденсаторы емкостью в сотые доли микрофард и менее дают слишком малое отклонение стрелки, поэтому судить об их параметрах становится трудно.

Удобно выполнять проверку конденсаторов, сравнивая их поведение с поведением заведомо исправных конденсаторов такой же емкости.

Выявление неполадок резисторов. При выявлении неполадок постоянных и переменных резисторов отпаивают один из выводов от фольги печатной платы и посредством омметра проверяют соответствие номинальному фактического сопротивления резистора. В случае переменных резисторов тем же омметром проверяют плавность изменения сопротивления резистора при перемещении подвижного контакта.

10.4. Измерение емкости и индуктивности

Качество электрических цепей зависит от степени соответствия их параметров требуемым значениям. Поэтому с необходимостью измерения емкости C и индуктивности L электротехнику приходится встречаться достаточно часто. На смену измерительным мостам, которые в подавляющем большинстве случаев применялись для измерения параметров конденсаторов, катушек, обмоток трансформаторов и т. п. приходят дешевые цифровые приборы, точности которых с избытком хватает для повседневного использования. Значение измерительных мостов сохранилось только в лабораторной практике для достижения предельной точности.

Типичным цифровым LC -метром является прибор «VC6243», представленный на рис. 10.13.

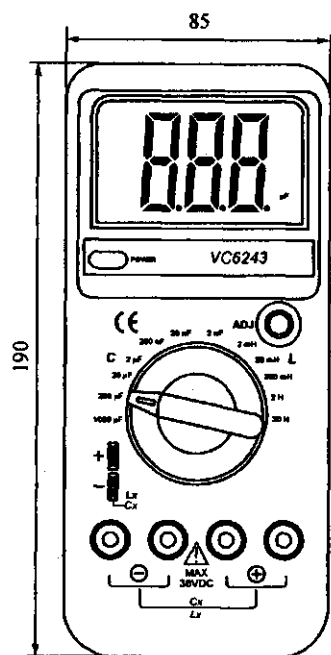


Рис. 10.13. Цифровой измеритель L и C «VC6243»

Электрические характеристики прибора сведены в таблице.

Таблица

L (индуктивность)				
Диапазон	Точность	Разрешение	Частота тестового сигнала	Ток, протекающий через индуктивность при измерении
2 мГн	$\pm(2\% + 5D)$	1 мкГн	1 кГц	150 мкА
20 мГн		10 мкГн	1 кГц	150 мкА
200 мГн		100 мкГн	1 кГц	150 мкА
2 Гн	$\pm(5\% + 5D)$	1 мГн	1 кГц	150 мкА
20 Гн	$\pm(5\% + 15D)$	10 мГн	100 кГц	15 мкА
C (емкость)				
Диапазон	Точность	Разрешение	Частота тестового сигнала	Напряжение на выводах конденсатора при измерении
2 нФ	$\pm(1\% + 5D)$	1 пФ	1 кГц	150 мВ
20 нФ		10 пФ	1 кГц	150 мВ
200 нФ		100 пФ	1 кГц	150 мВ
2 мкФ	$\pm(2\% + 5D)$	1 нФ	1 кГц	150 мВ
20 мкФ		10 нФ	100 Гц	150 мВ
200 мкФ		100 нФ	100 Гц	15 мВ
100 мкФ	Только качественно	1 мкФ	100 Гц	1,5 мВ

Точность определяется, как \pm (% от измеренного значения + число значений единицы младшего разряда D) при температуре 23 ± 5 °С и относительной влажности не более 75 %.

Контрольные вопросы

1. Каковы особенности измерений малых сопротивлений?
2. Каким образом в омметрах корректируется изменение ЭДС гальванического элемента?
3. Чем вызвано преимущественное использование логометрического измерительного механизма в мегаомметрах с внутренним электромеханическим генератором?
4. В чем заключается метод баллистического гальванометра?

Глава 11

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ

11.1. Общие сведения

Измерение мощности в цепях постоянного тока, активной и реактивной мощности в цепях переменного тока, однофазных и трехфазных, трехпроводных и четырехпроводных, производится в абсолютном большинстве случаев электродинамическими и ферродинамическими ваттметрами, выпускаемыми в соответствии с ГОСТ 8476—93.

В лабораторной практике применяются, главным образом, электродинамические ваттметры классов точности 0,1; 0,2; 0,3 и 0,5. В промышленности при технических измерениях широко применяются ферродинамические ваттметры классов точности 1,0; 1,5 и 2,5.

Шкалы ваттметров проградуированы в значениях измеряемой величины, т. е. в ваттах, киловаттах и т. д. Как электродинамические, так и ферродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

Электродинамические ваттметры применяются для измерения мощности в цепях постоянного тока и цепях переменного тока частотой до нескольких тысяч герц.

Ферродинамические ваттметры применяются для измерения мощности в цепях переменного тока, главным образом, промышленной частоты.

11.2. Измерение мощности в цепях постоянного тока

Из выражения, определяющего мощность, выделяемую в какой-либо нагрузке R_H ,

$$P = UI, \quad (11.1)$$

нетрудно видеть, что мощность P может быть определена косвенно путем проведения двух прямых измерений: напряжения на нагрузке U с помощью вольтметра и тока в нагрузке I с помощью амперметра. Наиболее целесообразно применение в этом случае вольтметра и амперметра магнитоэлектрической системы (рис. 11.1).

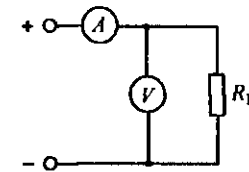


Рис. 11.1. Схемы включения приборов для измерения мощности в цепи постоянного тока

Несмотря на кажущуюся простоту и доступность, метод амперметра и вольтметра для измерения мощности P на практике применяется крайне редко. Это объясняется тем, что названный метод требует одновременного отсчета показаний двух приборов и последующего вычисления P .

Наиболее просто и с необходимой точностью измерение мощности производится непосредственно с помощью одного одноэлементного электродинамического ваттметра. Включение такого ваттметра в цепь постоянного тока необходимо осуществлять с соблюдением правильности соединения генераторных зажимов обмотки цепи тока и напряжения. На рис. 11.2 показано включение ваттметра PW для измерения мощности P .

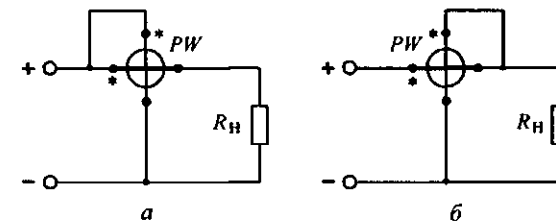


Рис. 11.2. Схемы включения ваттметра в цепь постоянного тока (знаком * отмечены генераторные зажимы): *a* — сопротивление нагрузки относительно большое; *б* — сопротивление нагрузки относительно малое

Генераторный зажим токовой обмотки ваттметра всегда включается в сторону источника питания.

Генераторный зажим обмотки напряжения, в целях уменьшения методической погрешности, может быть включен так, как это показано на рис. 11.2, *а* или *б*.

Схема рис. 11.2, *а* применяется при относительно большом значении сопротивления нагрузки R_H , а схема рис. 11.2, *б* — при относительно малом значении сопротивления нагрузки R_H , когда сопротивление нагрузки соизмеримо с сопротивлением токовой цепи. Значение сопротивления токовой цепи всегда указывается на циферблате прибора.

В большинстве случаев применения ваттметров сопротивление нагрузки R_H относительно велико (значение сопротивления нагрузки намного больше сопротивления последовательной токовой цепи ваттметра) и, следовательно, ваттметр необходимо включать по схеме рис. 11.2, *а*.

Несоблюдение правильности включения генераторного зажима любой из обмоток ваттметра приводит к изменению направления вращающего момента и выходу указателя ваттметра за пределы шкалы.

11.3. Измерение активной мощности в цепях переменного тока

Измерение активной мощности в однофазной цепи производится одноэлементными ваттметрами. Для измерения активной мощности в трехфазных цепях используются специальные двух- и трехэлементные ваттметры.

Расширение диапазонов измерения во всех случаях применения ваттметров в цепях переменного тока осуществляется с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Измерение мощности методом одного прибора. При использовании метода одного прибора измерение мощности осуществляется с помощью одноэлементного ваттметра. Метод применяется при измерении мощности в однофазных цепях и симметричных трехфазных цепях (комплексные сопротивления фаз одинаковы). И в том и в другом случае обмотка напряжения ваттметра включается на фазное напряжение, а обмотка тока включается в рассечку провода какой-либо фазы.

На рис. 11.3 показано включение одноэлементного ваттметра в однофазную цепь переменного тока. Показание ваттметра определяется формулой

$$P_W = UI \cos \varphi,$$

где U и I — действующие значения напряжения и тока нагрузки; φ — угол между U и I .

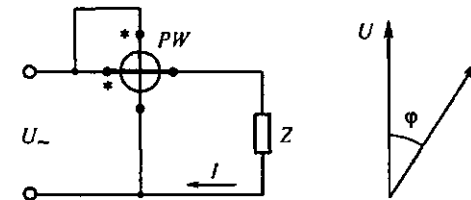


Рис. 11.3. Схема включения ваттметра в однофазную цепь переменного тока и векторная диаграмма

На рис. 11.4, *а*, *б* показано включение одноэлементного ваттметра в симметричную трехфазную трехпроводную цепь.

На рис. 11.4, *а* нагрузка соединена звездой и нулевая точка доступна. На рис. 11.4, *б* нагрузка соединена треугольником. Если ваттметр невозможно включить в фазу так, как это показано на рис. 11.4, *б*, или нулевая точка при соединении нагрузки звездой (рис. 11.4, *а*) недоступна, то в этом случае используется искусственная нулевая точка. Показание ваттметра в таком включении соответствует мощности одной фазы.

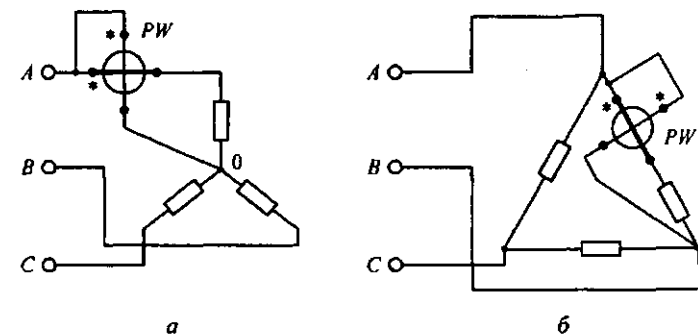


Рис. 11.4. Схемы включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь при полной симметрии: *а* — нагрузка соединена звездой и нулевая точка доступна; *б* — нагрузка соединена треугольником

Искусственная нулевая точка обычно создается с помощью двух резисторов (сопротивление каждого резистора равно сопротивлению цепи обмотки напряжения ваттметра) и сопротивления цепи обмотки напряжения. Сопротивление цепи обмотки напряжения любого ваттметра либо приведено на циферблате прибора, либо указывается в техническом паспорте на данный прибор.

Включение ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь по схеме с искусственной нулевой точкой показано на рис. 11.5.

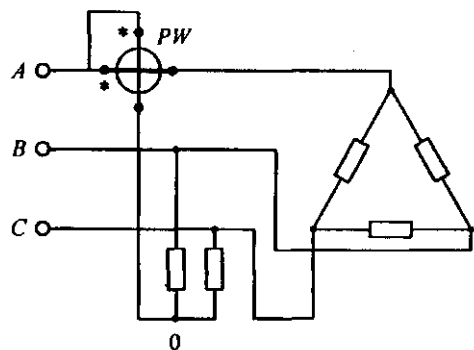


Рис. 11.5. Схема включения ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь с недоступной нулевой точкой при полной симметрии

Мощности одной фазы будет соответствовать и показание ваттметра в схеме на рис. 11.5. Действительно, фазное напряжение U_A , на которое включена обмотка напряжения ваттметра, равно $U_{AB}\sqrt{3}$. Линейный ток I_A в токовой обмотке ваттметра $I_{AB}\sqrt{3}$. Следовательно, показание ваттметра

$$P_W = \frac{U_{AB}}{\sqrt{3}} I_{AB} \sqrt{3} \cos(\dot{I}_A, \dot{U}_A) = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi.$$

Для получения мощности всей трехфазной цепи во всех трех рассматриваемых случаях необходимо показание ваттметра утроить:

$$P = 3P_W.$$

Эти рассуждения справедливы лишь при измерении мощности в симметричных цепях, т. е. при симметрии напряжений и равенстве комплексных сопротивлений фаз.

Расширение диапазона измерения ваттметра по току в цепях с большими токами производится с помощью измерительного трансформатора тока. Диапазон измерения по напряжению расширяют с помощью измерительного трансформатора напряжения.

Для примера на рис. 11.6, а показано включение ваттметра для измерения мощности в однофазной цепи через измерительный трансформатор тока, а на рис. 11.6, б — через измерительный трансформатор тока и измерительный трансформатор напряжения.

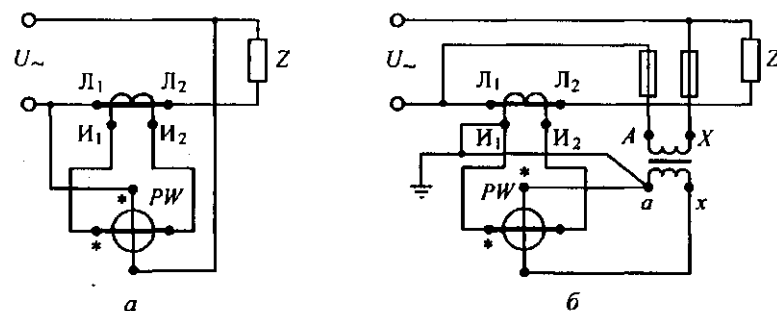


Рис. 11.6. Схемы включения ваттметра в однофазную цепь переменного тока: а — с использованием измерительного трансформатора тока; б — с использованием измерительных трансформаторов тока и напряжения

Следует обращать внимание на правильность подключения генераторных зажимов ваттметра и соответствующих зажимов измерительных трансформаторов. В схеме рис. 11.6, а значение измеряемой мощности P вычисляется умножением показания ваттметра P_W на номинальный коэффициент трансформации $K_{I_{ном}}$ применяемого измерительного трансформатора тока:

$$P = P_W K_{I_{ном}}.$$

В схеме рис. 11.6, б значение измеряемой мощности определяется по формуле

$$P = P_W K_{I_{ном}} K_{U_{ном}},$$

где $K_{U_{ном}}$ — номинальный коэффициент трансформации используемого измерительного трансформатора напряжения.

Измерение мощности методом двух приборов. Метод двух приборов используется при измерении мощности в трехфазной

трехпроводной цепи с помощью двух одноэлементных ваттметров. Метод дает правильные результаты независимо от схемы соединения и характера нагрузки как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений.

На рис. 11.7, *a* изображена схема включения двух одноэлементных ваттметров. Обычно токовая обмотка одного ваттметра, например PW_1 , включается в фазу *A*, а токовая обмотка другого ваттметра — PW_2 — в фазу *C*. Обмотки напряжения ваттметров включаются на линейные напряжения так, как это показано на рисунке.

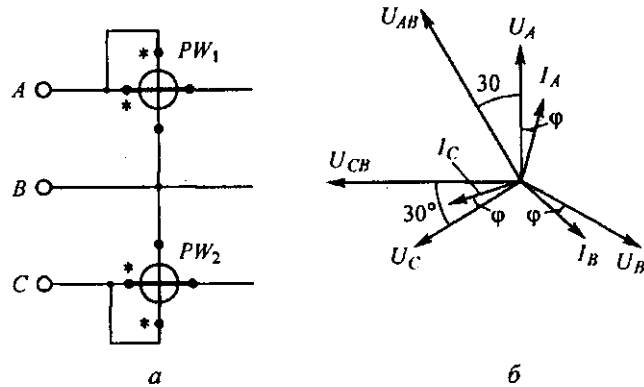


Рис. 11.7. Схема включения двух ваттметров в трехфазную трехпроводную цепь (*a*) и векторная диаграмма (*b*)

На рис. 11.7, *b* представлена векторная диаграмма цепи для частного случая — случая симметрии токов и напряжений.

Показание ваттметра PW_1 в этом случае равно

$$PW_1 = U_{AB} I_A \cos(30^\circ + \varphi) = U_n I_n \cos(30^\circ + \varphi), \quad (11.1)$$

а показание ваттметра PW_2 есть

$$PW_2 = U_{CB} I_C \cos(30^\circ - \varphi) = U_n I_n \cos(30^\circ - \varphi). \quad (11.2)$$

Учитывая, что при измерении мощности с использованием метода двух приборов общая мощность цепи равна алгебраической сумме показаний ваттметров, а из выражения (11.1) и (11.2), получаем:

$$P = PW_1 + PW_2 = U_n I_n \cos(30^\circ + \varphi) + U_n I_n \cos(30^\circ - \varphi).$$

После несложных преобразований имеем:

$$P = U_n I_n 2 \cos 30^\circ \cos \varphi = \sqrt{3} U_n I_n \cos \varphi. \quad (11.3)$$

Таким образом, сумма показаний ваттметров PW_1 и PW_2 , определяемая (11.3), есть не что иное, как мощность трехфазной цепи.

Отметим, что в соответствии с (11.1) и (11.2) показания каждого ваттметра могут быть положительными или отрицательными в зависимости от значения угла φ и его знака. При $\varphi = 0$, т. е. при чисто активной нагрузке, показание ваттметра PW_1 равно показанию ваттметра PW_2 .

Двухэлементные ваттметры, обычно называемые трехфазными ваттметрами, представляют собой конструкцию из двух измерительных механизмов одноэлементных ферродинамических ваттметров с одной общей подвижной частью.

Конструкция двухэлементного ферродинамического измерительного механизма, широко используемого для построения трехфазных ваттметров, показано на рис. 11.8. Два шихтованных

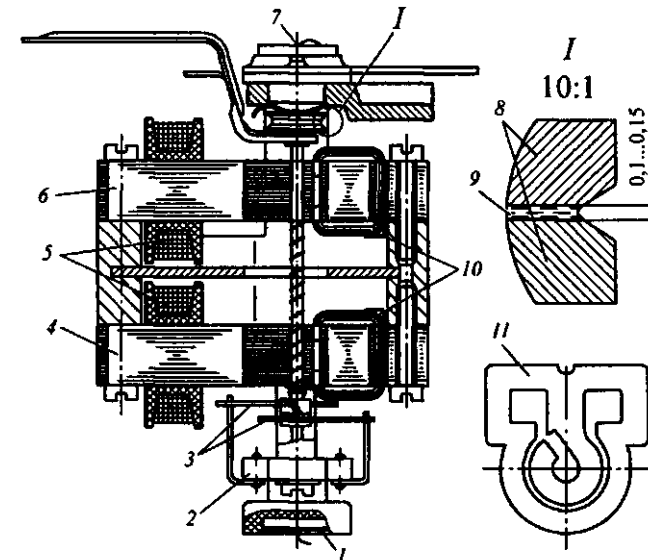


Рис. 11.8. Измерительный механизм двухэлементного ферродинамического ваттметра: 1 и 7 — пружина плоская для растяжки; 2 — мостик; 3 — токопроводы; 4 и 6 — магнитопроводы; 5 — токовые катушки; 8 — пластины успокоителя; 9 — жидкость ПСМ; 10 — токовые катушки; 11 — пластина магнитопровода

магнитопровода *b* имеют неподвижные токовые обмотки *5*. Обмотки напряжения, выполненные в виде подвижных рамок *10*, укреплены на общей оси.

Включение токовых обмоток и обмоток напряжения трехфазных двухэлементных ваттметров производится по схеме рис. 11.7.

Расширение диапазонов измерения трехфазных двухэлементных ваттметров так же, как и одноэлементных однофазных ваттметров, осуществляется с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения. На рис. 11.9 показано включение элементов двухэлементного трехфазного ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь через измерительные трансформаторы тока. В этом случае для получения мощности цепи показание ваттметра необходимо умножить на номинальный коэффициент трансформации $K_{I_{ном}}$ применяемых измерительных трансформаторов тока. Если измерение мощности осуществляется двумя одноэлементными ваттметрами, то на значение $K_{I_{ном}}$ умножается арифметическая сумма показаний ваттметров.

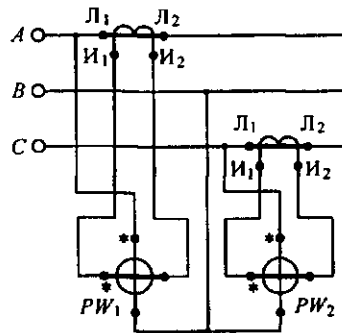


Рис. 11.9. Схема включения элементов двухэлементного ваттметра в трехфазную трехпроводную цепь с использованием трансформаторов тока

Измерение мощности методом трех приборов. Известно, что метод трех приборов применяется при измерении мощности в трехфазной четырехпроводной цепи (при этом используются три одноэлементных ваттметра). Так же, как и метод двух приборов, метод трех приборов дает правильные результаты независимо от схемы соединения и характера нагрузки как при симметрии, так и при асимметрии токов и напряжений. По схеме, реализующей метод трех приборов, включаются также элементы трехэлементных трехфазных ваттметров.

На рис. 11.10 приведена схема включения трех одноэлементных ваттметров по методу трех приборов в трехфазную четырехпроводную цепь, в этом случае каждый ваттметр измеряет мощность одной фазы:

$$P_{W_1} = P_A = U_A I_A \cos \varphi_A;$$

$$P_{W_2} = P_B = U_B I_B \cos \varphi_B;$$

$$P_{W_3} = P_C = U_C I_C \cos \varphi_C,$$

где U_A , U_B и U_C — фазные напряжения; I_A , I_B и I_C — фазные токи; φ_A , φ_B и φ_C — фазовые сдвиги между соответствующими фазными напряжениями и фазными токами.

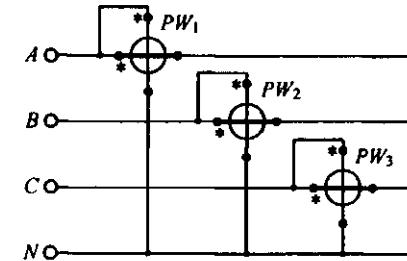


Рис. 11.10. Схема включения трех ваттметров в трехфазную четырехпроводную цепь

Очевидно, что для нахождения мощности трехфазной четырехпроводной цепи необходимо взять алгебраическую сумму показаний всех ваттметров:

$$P = P_A + P_B + P_C = P_{W_1} + P_{W_2} + P_{W_3}.$$

Конструктивная схема трехэлементного трехфазного ферродинамического ваттметра приведена на рис. 11.11.

Каждый элемент содержит выполненный из магнитомягкого материала шихтованный магнитопровод с неподвижной токовой обмоткой *3*. Подвижные рамки элементов *2* жестко укреплены на одной оси. Таким образом, на подвижную часть трехфазного трехэлементного ваттметра действует арифметическая сумма моментов всех трех элементов. Непосредственное включение элементов ваттметра в трехфазную четырехпроводную цепь осуществляется по схеме, изображенной на рис. 11.10.

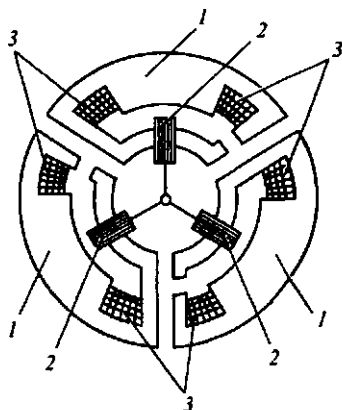


Рис. 11.11. Трехэлементный ферродинамический измерительный механизм:
1 — магнитопровод; 2 — подвижные рамки; 3 — неподвижные обмотки

Расширение диапазонов измерения трехэлементных трехфазных ваттметров осуществляется так же, как и двухэлементных ваттметров, — с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения.

Контрольные вопросы

1. На что следует обращать внимание при подключении электродинамического ваттметра?
2. Как создается искусственная нулевая точка?
3. Какие ваттметры применяются в трехфазной четырехпроводной цепи?

Глава 12 ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ

12.1. Одноэлементный индукционный счетчик

Одноэлементный индукционный счетчик используется для учета активной энергии в однофазных цепях переменного тока (в РФ учет реактивной энергии в однофазных цепях переменного тока в виду малости реактивной нагрузки не производится). В технической литературе счетчики электроэнергии (СЭ), предназначенные для учета энергии в однофазных цепях переменного тока, называют однофазными счетчиками.

Изобретенный Феррариусом в 1884 г. электромеханический счетчик активной электроэнергии индукционного типа до сих пор занимает доминирующее положение в системе учета потребления электроэнергии. В результате производства таких счетчиков в течение ста с лишним лет в огромных масштабах их конструкция и технология производства отработаны в мельчайших деталях. В настоящее время это совершенный прибор с длительным сроком эксплуатации и с относительно низкой стоимостью.

В качестве вращающего элемента однофазного счетчика используется индукционный измерительный механизм. Принцип действия механизма основан на взаимодействии двух или нескольких переменных магнитных потоков с токами, индуцированными ими в подвижном алюминиевом диске. Индукционные приборы по принципу их действия пригодны лишь для переменных токов, так как в диске или цилиндре ток может индуцироваться лишь под действием переменного магнитного потока.

Если на пути переменного магнитного потока поместить, например, край алюминиевого диска, способного вращаться вокруг некоторого центра, то в диске будет наводиться перемен-

ный индуцированный ток, взаимодействующий с этим потоком, но вращающий момент не появится, будут присутствовать только растягивающие или сжимающие силы.

Поэтому для создания вращающего момента часто используют два магнитных потока, сдвинутых относительно друг друга по фазе на некоторый угол (например, на $\pi/2$). При этом возникает вращающееся магнитное поле.

Индукционный СЭ имеет две катушки с сердечниками: токовую катушку и катушку напряжения.

Токовую катушку (рис. 12.1, а) навивают толстым проводом на стальной сердечник 1 и включают последовательно с нагрузкой.

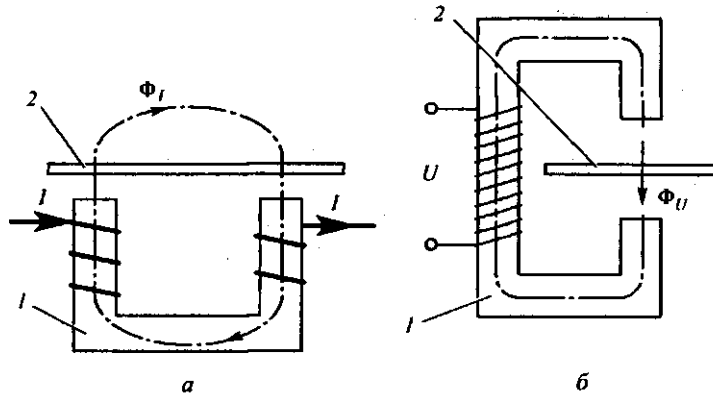


Рис. 12.1. Создание магнитных потоков в индукционном механизме: 1 — стальной сердечник; 2 — алюминиевый диск

Магнитный поток в ней Φ_I пропорционален току нагрузки.

Катушку напряжения (рис. 12.1, б) обычно навивают большим числом витков тонкого провода на стальной сердечник 1. Индуктивное сопротивление X_L этого электромагнита много больше активного сопротивления ($X_L \gg R$), поэтому эту цепь можно считать чисто индуктивной и, следовательно, ток I_U в катушке напряжения отстает по фазе от напряжения на $\pi/2$.

Край алюминиевого диска одновременно пронизывается обоими потоками: дважды потоком Φ_I токовой катушки и один раз потоком Φ_U катушки напряжения.

Эти потоки индуцируют в диске токи $-I_{qI}$ и I_{qU} соответственно. При этом ток I_{qI} взаимодействует с потоком Φ_U , а ток I_{qU} взаимодействует с потоком Φ_I .

Направление индукционных токов I_{qI} и I_{qU} зависит от того, возрастает или убывает создающий в данный момент поток. Учитывая изменение токов I_{qI} и I_{qU} , используя правило Ленца и применяя правило левой руки, находим, что силы F_1 и F_2 , создающие вращающий момент, имеют одинаковое направление: от опережающего потока к отстающему. Найдем значения сил F_1 и F_2 .

По закону Ампера

$$F = B I \sin \alpha,$$

где

$$B = \frac{\Phi}{S}, \quad \sin \alpha = 1.$$

Тогда мгновенное значение силы F' равно:

$$F' = c I \Phi,$$

где

$$c = \frac{1}{S}.$$

Для мгновенных значений сил F'_1 и F'_2 , создаваемых двумя обмотками можно записать:

$$F'_1 = c_1 i_{qU} \Phi_I,$$

$$F'_2 = c_2 i_{qI} \Phi_U.$$

Построим векторную диаграмму взаимодействующих величин (рис. 12.2).

За основной вектор принимается вектор приложенного напряжения U . Пусть нагрузка такова, что ток I отстает по фазе от напряжения U на некоторый угол φ . Ток I создает в электромагните магнитный поток Φ_I , совпадающий с ним по фазе.

Магнитный поток Φ_U индуцирует в диске ЭДС E_{qU} , которая отстает по фазе от потока на угол $\pi/2$. Под действием ЭДС E_{qI} в диске возникает индукционный ток I_{qI} . Если предположить, что сопротивление материала диска чисто активное, то I_{qI} и E_{qI} совпадут по фазе.

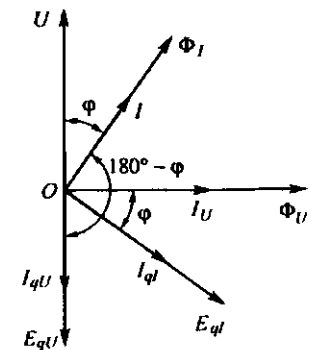


Рис. 12.2. Векторная диаграмма процессов в индукционном механизме

Катушку напряжения, имеющую большое число витков и стальной, почти замкнутый сердечник, можно рассматривать как чисто индуктивную нагрузку, поэтому ток в этой катушке I_U можно считать отстающим по фазе от напряжения U на угол $\pi/2$.

Ток I_U создает магнитный поток Φ_U , совпадающий с ним по фазе. Магнитный поток Φ_U в свою очередь наводит в диске ЭДС индукции E_{qU} , отстающую от него по фазе на $\pi/2$.

Под действием ЭДС E_{qU} в диске возникает индукционный ток I_{qU} , совпадающий по фазе с ЭДС E_{qU} .

На основании векторной диаграммы можно записать:

$$i_{qU} = I_{qUm} \sin(\omega t - \pi) = -I_{qUm} \sin \omega t;$$

$$\Phi_I = \Phi_{im} \sin(\omega t - \varphi);$$

$$i_{qI} = I_{qIm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right);$$

$$\Phi_U = \Phi_{Um} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right).$$

Тогда

$$F_1' = -c_1 I_{qUm} \sin \omega t \cdot \Phi_{im} \sin(\omega t - \varphi);$$

$$F_1 = \frac{1}{T} \int_0^T F_1' dt = c_1' IU \cos \varphi;$$

$$F_2' = c_2 I_{qIm} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2} - \varphi\right) \cdot \Phi_{Um} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right);$$

$$F_2 = \frac{1}{T} \int_0^T f_2 dt = c_2' IU \cos \varphi.$$

Значение результирующей силы F , действующей на диск равно:

$$F = F_1 + F_2 = (c_1' + c_2') IU \cos \varphi.$$

Значение вращающего момента $M_{вр}$, действующего на диск равно:

$$M_{вр} = Fd = c' IU \cos \varphi,$$

где

$$c' = (c_1' + c_2')d.$$

Под действием вращающего момента диск пришел бы в ускоренное вращение, и число оборотов не соответствовало бы израсходованной электрической энергии, поэтому необходимо наличие противодействующего момента. Как создаются вращающий и противодействующий моменты, показано на рис. 12.3.

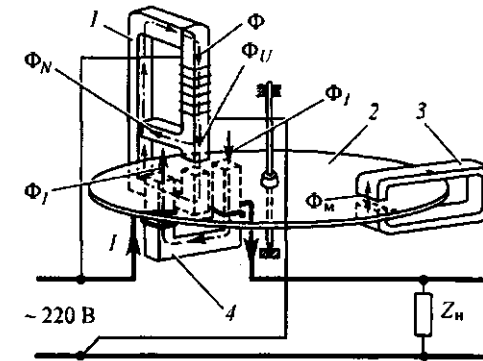


Рис. 12.3. Схематическое устройство индукционного однофазного счетчика: 1 — электромагнит с обмоткой напряжения; 2 — алюминиевый диск; 3 — постоянный магнит; 4 — электромагнит с обмоткой тока

Электромагнит 1 имеет вид перевернутой буквы Б. Его обмотка рассчитана на напряжение сети и включается параллельно нагрузке. Магнитный поток Φ этого электромагнита разветвляется и частично (Φ_U) пронизывает диск в одном направлении, а частично (Φ_N) замыкается через средний стержень с регулируемым воздушным зазором. Этот стержень называют магнитным шунтом для потока Φ . Система двух электромагнитов создает вращающий момент.

Противодействующий момент $M_{пр}$ в индукционном счетчике создается действием поля постоянного магнита 3 и электромагнитов на движущийся край диска 2:

$$M_{пр} = c''v = c'''2\pi Rn = c'''n,$$

где c'' — постоянный для данного прибора коэффициент, зависящий от материала диска, его толщины и индукции поля постоянного магнита; v — значение линейной скорости движения диска; R — радиус диска; c''' — коэффициент, постоянный для данного прибора.

Движение диска станет равномерным, когда вращающий момент $M_{вр}$ и противодействующий момент $M_{пр}$ окажутся равными, т. е.:

$$c''n = c'P.$$

Умножив обе части последнего равенства на промежуток времени t , получим:

$$c''nt = c'Pt,$$

где $nt = N$ — число оборотов диска за время t , $Pt = W$ — электрическая энергия за то же время t , следовательно:

$$W = Pt = \frac{Nc''}{c'} = cN,$$

где W — энергия, израсходованная нагрузкой за время t ; c — постоянная счетчика; N — число оборотов диска за время t .

Таким образом, число оборотов диска N индукционного счетчика пропорционально израсходованной электрической энергии.

Описанный принцип работы индукционного механизма использован в широко распространенном однофазном СЭ «СО-1», устройство которого показано на рис. 12.4.

Счетчик регистрирует энергию в кВт · ч. Об израсходованной энергии судят по разности показаний счетного механизма за интересующий промежуток времени.

Для характеристик счетчика введены следующие параметры:

- действительная постоянная счетчика c представляет собой значение электрической энергии в ватт-секундах, действительно израсходованной за время одного оборота диска:

$$c = \frac{W}{N} = \frac{Pt}{N};$$

- номинальная постоянная счетчика c_n — количество электрической энергии, которое учитывает счетный механизм за время одного оборота диска;
- передаточное число A_n — величина, обратная номинальной постоянной счетчика c_n , часто применяемая на практике:

$$A_n = \frac{1}{c_n} = \frac{N}{1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}}.$$

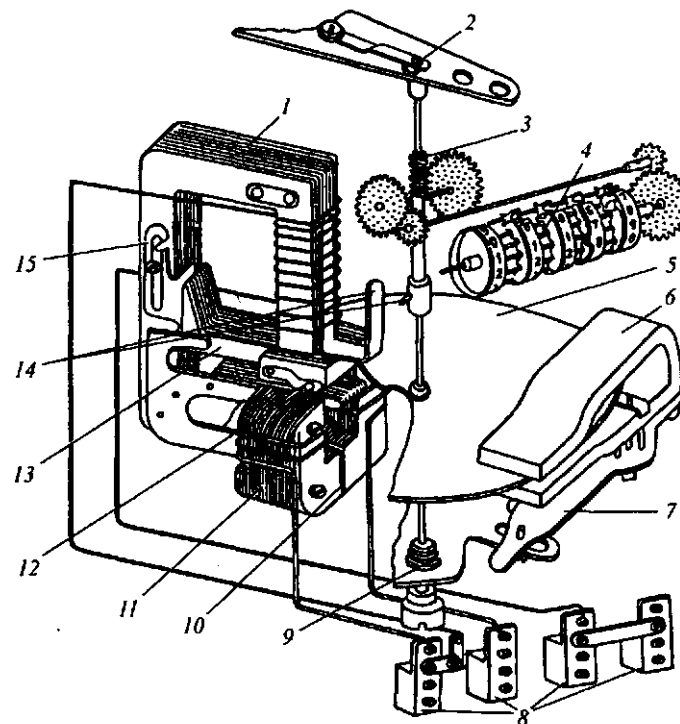


Рис. 12.4. Устройство СЭ «СО-1»: 1 — магнитопровод катушки напряжения; 2 — подшипник; 3 — червячная передача; 4 — счетный механизм; 5 — диск; 6 — тормозной магнит; 7 — приспособление для перемещения тормозного магнита; 8 — зажимные контакты; 9 — подпятник; 10 — короткозамкнутые витки; 11 — магнитопровод токовой катушки; 12 — регулятор малой нагрузки; 13 — магнитный мостик; 14 — противосамоходное устройство; 15 — медная пластинка (регулятор внутреннего фазового сдвига)

Передаточное число — число оборотов диска, соответствующее израсходованной энергии в 1 кВт · ч. Указывается на щитке счетчика;

- относительная погрешность счетчика

$$\Delta = \frac{W_1 - W_2}{W_2} 100 \%,$$

где W_1 — энергия, учтенная счетчиком; W_2 — энергия, действительно израсходованная (вычисленная по показаниям точных приборов).

Так как $W_1 = c_n N$, $W_2 = cN$, то относительную погрешность счетчика Δ можно выразить через номинальную и действительную постоянные:

$$\Delta = \frac{c_n - c}{c} 100 \%;$$

- чувствительность счетчика P_{\min} — наименьшая мощность в нагрузке, при которой диск счетчика начинает безостановочное вращение. Измеряется в ваттах.

12.2. Двух- и трехэлементные индукционные счетчики

Двухэлементные счетчики используются для учета активной энергии в трехфазных трехпроводных цепях переменного тока.

Трехэлементными счетчиками учитывается активная и реактивная энергия в трехфазных четырехпроводных цепях переменного тока. Кроме того, трехэлементные счетчики применяются также для учета реактивной энергии в трехфазных трехпроводных цепях переменного тока.

В качестве вращающих элементов как в двухэлементных, так и в трехэлементных счетчиках используются вращающие элементы одноэлементных индукционных счетчиков.

Как в двухэлементных, так и в трехэлементных счетчиках диски вращающих элементов укрепляются на одной оси. Это позволяет получать общий вращающий момент подвижной части счетчика, равный алгебраической сумме вращающих моментов отдельных элементов. Таким образом, независимо от количества применяемых вращающих элементов в счетчиках устанавливается один счетный механизм.

На рис. 12.5, *а* показано принципиальное конструктивное выполнение двухэлементного счетчика, а на рис. 12.5, *б* — трехэлементного счетчика.

Для двух- и трехэлементных счетчиков введены следующие обозначения:

СА3 — счетчики для учета активной энергии в трехфазной трехпроводной цепи;

СА4 — счетчики для учета активной энергии в трехфазной четырехпроводной цепи;

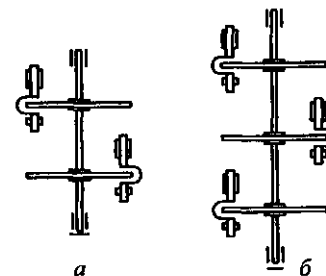


Рис. 12.5. Конструктивное выполнение счетчиков: *а* — двухэлементного; *б* — трехэлементного

СР4 — счетчики для учета реактивной энергии в трехфазных трех- и четырехпроводных цепях.

В некоторых случаях к обозначению счетчиков добавляется буква У (универсальный). Например: СА3У, СА4У, СР4У. Эти счетчики предназначены для работы с измерительными трансформаторами тока и измерительными трансформаторами напряжения с любыми коэффициентами трансформации.

12.3. Схемы включения счетчиков

Включение вращающих элементов счетчиков производится по схемам включения ваттметров, описанным в главе 11.

Генераторные зажимы токовых обмоток счетчиков обозначаются буквой Г, а зажимы, к которым подключается нагрузка, — буквой Н. Зажимы обмоток напряжения счетчиков, предназначенных для включения в трехфазные трех- или четырехпроводные цепи, обозначаются цифрами 1, 2, 3 и 0.

Рассмотрим наиболее распространенные схемы включения счетчиков.

Схемы включения однофазных (одноэлементных) счетчиков. На рис. 12.6 изображена схема расположения зажимов и присоединения к ним обмоток однофазного счетчика непосредственного включения.

Схемы включения трехфазных двухэлементных счетчиков. Включение вращающих элементов двухэлементных счетчиков, предназначенных для учета активной энергии в

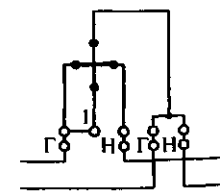


Рис. 12.6. Схема включения однофазного счетчика

трехфазных трехпроводных цепях, производится по схемам включения двух ваттметров для измерения активной мощности.

На рис. 12.7 изображена схема расположения зажимов и присоединения к ним обмоток трехфазного двухэлементного счетчика типа СА3.

Схемы включения трехфазных трехэлементных счетчиков. Трехфазные трехэлементные счетчики применяются для учета активной энергии в трехфазных четырехпроводных цепях.

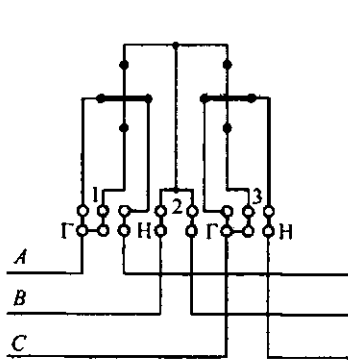


Рис. 12.7. Схема включения счетчика типа СА3

На рис. 12.8 показана схема расположения зажимов и присоединения к ним обмоток трехфазного трехэлементного счетчика типа СА4 непосредственного включения. Нетрудно видеть, что вращающиеся элементы счетчика включаются в трехфазную четырехпроводную цепь точно так же, как включаются три ваттметра для измерения в такой цепи активной мощности, т. е. применяется рассмотренный ранее (см. раздел 11.3) метод трех приборов.

12.4. Электронные счетчики

Описанные в разделе 12.3 СЭ имеют в ряде случаев недостаточную точность и ограниченные функциональные возможности, что проявляется уже при создании простейших двухтарифных систем (рис. 12.9) или организации дистанционного сбора показаний счетчиков.

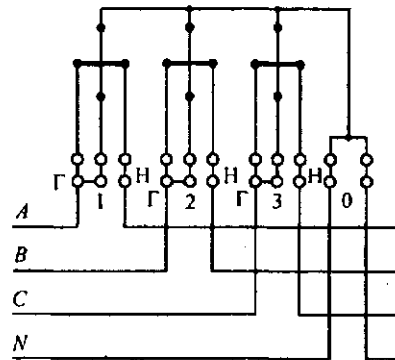


Рис. 12.8. Схема включения счетчика типа СА4

Интенсивное развитие автоматизированных систем учета потребления электроэнергии, введение многотарифности и предоплаты выдвинули задачу создания качественно нового прибора для измерения электроэнергии — электронного СЭ, совместимого с другими элементами системы учета и обладающего большей точностью, чем индукционные.

Первые образцы электронных счетчиков стоили дорого, поэтому их внедрение началось с трехфазных электронных счетчиков трансформаторного типа для электроэнергетических систем. Затем появились трехфазные счетчики непосредственного включения для электроустановок 0,4 кВ, а 90-е гг. ушедшего века характеризуются интенсивным развитием производства электронных однофазных счетчиков бытового назначения.

Если первые разработки электронных СЭ выполнялись на дискретной элементной базе, имели сложные электрические схемы с большим количеством элементов и поэтому отпугивали потребителей, то большинство современных счетчиков используют специализированные БИС для преобразователя мощности, имеют относительно простые электрические схемы и из-за этого высокую надежность.

Схемотехнические решения, применяемых в счетчиках различных фирм отличаются большим разнообразием: в настоящее время в качестве измерительного преобразователя тока используются трансформаторы тока с замкнутым ферромагнитным сердечником, *трансреакторы* (трансформаторы с воздушным зазором), воздушные трансформаторы, шунты. Кроме того, применяются измерительные преобразователи мощности на основе эффекта Холла.

Предприятия России, Украины и Белоруссии используют, в основном, трансформаторы тока с магнитопроводом из лент аморфного железа, полученного путем быстрого охлаждения расплава, так как высокая магнитная проницаемость этого магнетномягкого материала обеспечивает малую угловую погрешность. В связи с тем, что для счетчиков непосредственного включения правила МЭК-1036 нормируют погрешность при наличии посто-

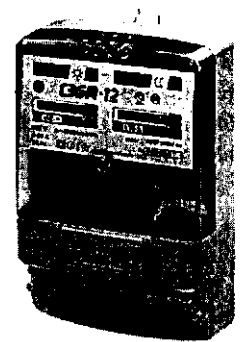


Рис. 12.9. Двухтарифный счетчик СЭБМ-12

янной составляющей в цепи тока, западные фирмы используют трансформаторы тока только в счетчиках трансформаторного типа, причем магнитопровод выполняется, как правило, из пермаллоя. Это вызвано тем, что аморфному железу присущ эффект «старения», сопровождающийся падением магнитной проницаемости. Однако последние исследования показали, что процесс кристаллизации при обычных температурах (менее 60 °С) идет достаточно медленно, и заметного ухудшения магнитных свойств аморфного железа можно ожидать лишь через 80...100 лет после прокатки ленты.

В СЭ класса 0,2 для уменьшения угловой погрешности применяются схемы с электронной компенсацией намагничивающего тока, либо вводятся поправки, определяемые при тарифовке счетчиков и учитываемые автоматически на программном уровне в процессе работы счетчика. В трехфазных счетчиках непосредственного включения зарубежные фирмы используют преобразователи на основе эффекта Холла.

Для однофазных счетчиков в последнее время все чаще стали использовать маломощные шунты с сопротивлением примерно 1,0 МОм. В трехфазных счетчиках их применение ограничено из-за трудностей с обеспечением гальванической развязки токовых цепей. Если сравнивать различные конструкции счетчиков по критерию стоимости, то наилучшим решением для однофазных счетчиков является применение шунта в сочетании с микросхемой преобразователя мощности, способной работать от входных сигналов канала тока малого уровня (примерно 50 мкВ). Темпы развития микроэлектроники позволяют прогнозировать развитие однофазных счетчиков именно в этом направлении.

В настоящее время большинство фирм для преобразования входных сигналов тока и напряжения в частоту пропорциональную активной мощности, используют специальные микросхемы. В России наибольшее распространение получили микросхемы КР1095ПП1 производства ПО «Восход» (г. Калуга). Они обладают хорошими метрологическими характеристиками, и на их базе можно выпускать СЭ класса 0,5, а при специальном отборе — 0,2 и даже образцовые. Основными недостатками КР1095ПП1 являются повышенное потребление (7...10 мА) и отсутствие выхода модуля мощности.

На российском рынке присутствуют также микросхемы преобразователей мощности импортного производства. В частности,

фирма *Analog Devices* предлагает семейство микросхем AD7750-55, на которых можно построить различные модификации счетчиков (однофазные, трехфазные, активной или реактивной энергии, рассчитанные на работу с электромеханическим отсчетным устройством или жидкокристаллическим индикатором и т. д.). Схемы содержат два АЦП (каналов тока и напряжения), цифровой умножитель, цифровые фильтры, преобразователь код — частота. Первые версии микросхем имели относительно большую угловую погрешность, что затрудняло их применение даже в счетчиках класса 1,0. В настоящее время этот недостаток в значительной степени устранен. Основные погрешности микросхем не более 0,3 %. К достоинствам микросхемы следует отнести встроенный источник опорного напряжения, малое энергопотребление, однополярный источник питания, одинаковый потенциал аналоговой и цифровой «земли». Аналогичными свойствами обладает микросхема SPM фирмы *D-Tech* (Германия). Главным препятствием применения импортных микросхем в России является их относительно высокая стоимость. Вместе с тем, в ближайшее время следует ожидать появления новых отечественных микросхем преобразователей мощности производства ведущих российских микроэлектронных компаний «Ангстрем» и «Микрон». Заявленные параметры и функциональные возможности этих компонентов свидетельствуют о хороших перспективах электронных счетчиков, построенных на их базе.

Мировая практика показывает, что в простых, в первую очередь бытовых, счетчиках применяются электромеханические отсчетные устройства, принципиально обладающие энергонезависимой памятью. Однако при сравнительно низкой стоимости они чувствительны к сильным магнитным полям и не всегда имеют высокую надежность, а их функциональные возможности ограничены. Поэтому в сложных многотарифных счетчиках с отображением дополнительной информации повсеместно применяются жидкокристаллические индикаторы (ЖКИ), также имеющие ряд недостатков. Помимо повышенной стоимости, ЖКИ в ряде случаев не обеспечивают требуемый температурный диапазон работы и требуют для установки счетчика отапливаемого помещения. Другие способы индикации (на светоизлучающих матрицах, люминесцентные и пр.) не нашли широкого применения из-за недостаточной совместимости с другими элементами схемы.

В настоящее время можно утверждать, что с помощью электронных счетчиков удалось решить задачу обеспечения необходимой точности учета энергопотребления, особенно в зоне малых нагрузок, и расширения до 100 А динамического диапазона измерений для счетчиков непосредственного включения. По данным Мособлэнергонадзора электронные однофазные счетчики позволяют ликвидировать недоучет до 10...15 % отпущенной электроэнергии. Электронные счетчики доказали свою эффективность при построении на их базе автоматизированных систем контроля и учета. Отсутствие трущихся механических частей значительно повышает надежность устройства.

Таким образом, дальнейшее развитие электронных счетчиков можно прогнозировать в следующих направлениях:

- создание счетчиков с повышенной защитой от хищений, вплоть до самоотключения при обнаружении нештатного подсоединения;
- создание счетчиков с ограничением потребления сверх заявленной мощности;
- создание счетчиков со встроенным устройством мониторинга параметров качества электроэнергии;
- создание счетчиков, имеющих модули связи, способные передавать и принимать информацию по силовой сети 0,4 кВ.

Обработка аналоговой информации в цифровом виде принципиально позволяет одновременно определять как активную, так и реактивную составляющие мощности, что является важным, например, при учете распределения энергии в трехфазных сетях.

Появляется возможность создания многотарифных счетчиков. При работе такого СЭ значение накопленной энергии записывается в накопительный буфер текущего тарифа. Выбор текущего тарифа осуществляется автоматически. Например, «льготный» тариф может быть установлен на ночное время и на праздничные дни; «пиковый» тариф — на время от 13:00 до 15:00 в будние дни; «штрафной» тариф, может включаться при превышении установленных лимитов мощности и энергии; в остальное время действует «основной» тариф.

В цифровых СЭ несложно реализовать внешний канал связи, по которому можно считывать показания счетчиков, изменять тарифы, производить диагностику и управление. Такие счетчики могут быть организованы в единую сеть с централизованным

доступом через модем в телефонную линию. Таким образом, пользуясь городской телефонной сетью, можно программировать или считывать информацию с любого СЭ в доме.

Цифровой СЭ может осуществлять статистические исследования, например, вычислять среднюю мощность потребления нагрузки и ее дисперсию, а также хранить информацию о накопленной энергии за произвольные промежутки времени. Например, в бытовом СЭ можно реализовать сохранение накопленной информации за год по каждому из предшествующих 11 месяцев и сделать просмотр этой информации доступным для пользователя. Использование накопленной статистической информации для прогнозирования и управления распределением энергоресурсов может в значительной степени повысить эффективность работы энергосистемы в целом.

Применение цифровой базы делает возможным создание автоматизированной изолированной системы потребления, учета, распределения энергии и платежей. В такой системе может быть, например, предусмотрена предварительная оплата электроэнергии. Пользователь, в этом случае, заранее оплачивает определенное количество энергии. Информация об оплате либо поступает на счетчик по внешним каналам связи, либо может быть записана на специальную электронную карточку, индивидуальную для каждого пользователя. Карточка программируется в пункте оплаты, после чего записанная информация считывается СЭ с помощью встроенного картридера. Если лимит купленной энергии будет исчерпан, а новая оплата не внесена, счетчик отключает пользователя от энергосети. Таким образом в подобной системе исключается задолженность платежей за электроэнергию.

Цифровые СЭ могут выполняться в различных конструктивных исполнениях. Масса и объем цифровых СЭ значительно меньше электромеханических. Применение цифровых дисплеев позволяет значительно повысить удобство представления информации для пользователя.

Следует отметить, что стоимость СЭ на микроконтроллерном управлении в настоящее время несколько выше стоимости механических СЭ. Однако в перспективе следует ожидать значительного снижения цены первых.

В простейшем случае цифрового СЭ, когда требуется лишь измерение числа импульсов, вывод информации на дисплей и защита при аварийных сбоях напряжения питания (т. е., факти-

чески, цифрового функционального аналога существующих механических счетчиков), система может быть построена, например, на базе простейшего микроконтроллера фирмы *Motorola* MC68HC05KJ1.

Блок-схема такого СЭ представлена на рис. 12.10.

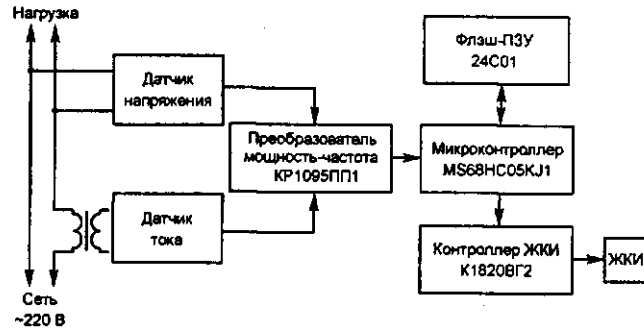


Рис. 12.10. Блок-схема простейшего электронного СЭ

Сигналы, пропорциональные значениям напряжения и тока в сети, поступают через соответствующие датчики на входы микросхемы КР1095ПП1, преобразующей аналоговый сигнал на входе в частоту следования импульсов на выходе. Микроконтроллер MS68HC05KJ1 подсчитывает количество пришедших импульсов, преобразовывая его в значения потребленной энергии в Вт·ч. Результат выводится на дисплей и записывается во флэш-память. Если происходит сбой при временном исчезновении напряжения сети, информация о накопленной энергии сохраняется во флэш-памяти. После восстановления питающего напряжения эта информация считывается микроконтроллером, выводится на индикатор, и счет продолжается с этой величины. Реализация такого алгоритма требует менее 1 Кбайта памяти микроконтроллера. Примененный в данной схеме микроконтроллер MS68HC05KJ1 выпускается в 16-выводном корпусе (DIP или SOIC), имеет 1,2 Кбайт ПЗУ и 64 байт ОЗУ. Его стоимость в исполнении ОТР (*One Time Programmable* — однократно программируемый) меньше 1 долл. Для хранения накопленной информации при сбоях питания служит флэш-ПЗУ малого объема 24C01 (128 байт памяти). В качестве дисплея используется простейший 6...8-разрядный 7-сегментный ЖКИ, управляемый контроллером К1820ВГ2. Учитывая стоимость этих компонен-

тов, преобразователя КР1095ПП1, а также остальных компонентов счетчика (токового трансформатора, источника питания, печатной платы и так далее), получается, что стоимость такой системы (не считая корпуса) составляет не более 10 долл.

В случае реализации многотарифного СЭ, устройство должно обеспечивать обмен информацией с внешними устройствами по стандартному каналу связи и управления RS-485. Он может использоваться для задания тарифов, инициализации и коррекции таймера реального времени, получения информации о накопленных значениях энергии и так далее. Блок-схема такого устройства, реализованного на микроконтроллере фирмы *Motorola* MC68HC05L16, представлена на рис. 12.11.

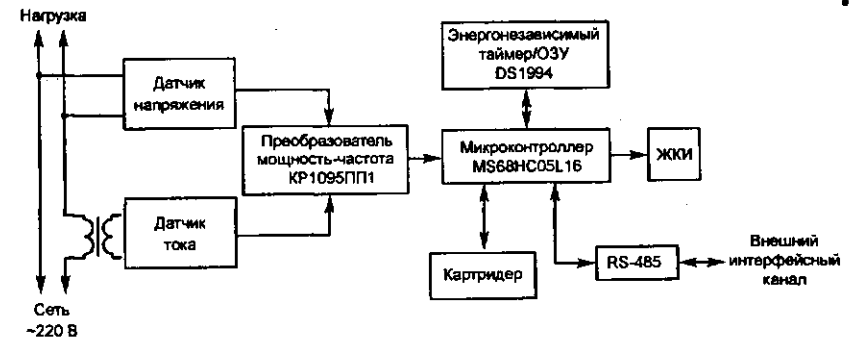


Рис. 12.11. Блок-схема многотарифного электронного СЭ

Рассмотрим алгоритм работы счетчика. Память энергонезависимого ОЗУ разбита на 13 банков, в каждом из которых хранится информация о потребленной энергии по четырем тарифам: общему, льготном, пиковом и штрафном. В первом банке накапливаются данные с момента начала эксплуатации счетчика, следующие 12 банков соответствуют накоплениям за 11 предыдущих и за текущий месяцы. Количество потребленной энергии за месяц записываются в соответствующий банк, и таким образом имеется возможность определить, сколько было истрачено энергии за любой из 11 предшествующих месяцев. Перед началом эксплуатации счетчика на заводе-изготовителе обнуляют содержимое банков памяти, т. е. накопление начинается с нулевых значений.

Переключение тарифов осуществляется по временным критериям: для каждого дня недели определяется свое тарифное распи-

сание, т. е. времена начала основного и льготного тарифов и от нуля до трех интервалов времени — для пикового тарифа. До 16 произвольных дней в году могут быть определены как праздничные, в эти дни работает тарифное расписание для воскресенья.

В счетчике может быть установлен режим ограничения по мощности и по количеству израсходованной за месяц энергии. В этом режиме счетчик фиксирует количество энергии, израсходованной сверх лимита. При превышении установленного лимита энергии производится либо переход на счет по штрафному тарифу, либо отключение пользователя от энергосети. Штрафной тариф также может быть установлен по каналу связи в случае, например, задолженности по оплате.

Каждый раз при включении счетчика в сеть (скажем, после очередного пропадания напряжения в сети) фиксируется время и дата этого момента для возможности последующего контроля. Также предусмотрена запись времени и даты несанкционированного снятия крышки устройства.

Через специальный разъем к счетчику можно подключить индивидуальную электронную карточку потребителя с информацией о количестве оплаченной энергии. При исчерпании оплаченного лимита счетчик отключает потребителя от энергосети.

Наличие режима нескольких тарифов позволяет выводить на дисплей дополнительную информацию о количестве потребления энергии по различным тарифам. Внешний вид дисплея такого счетчика представлен на рис. 12.12.

Значение количества потребленной энергии выводится на 8 нижних разрядах (максимальное значение 99 999,999 кВт·ч). Информация периодически изменяется (с промежутком в несколько секунд), последовательно показывая содержимое накопленных по каждому из тарифов и сумму этих накоплений. Вначале эти данные выводятся за текущий месяц (высвечивается надпись «за месяц») и затем с момента эксплуатации счетчика



Рис. 12.12. Общий вид индикатора многотарифного СЭ

(высвечивается надпись «всего»). Синхронно на символьном поле индикатора (5 × 7 точек) высвечивается знак того тарифа, к которому относятся текущие показания восьмиразрядного индикатора («о» — основной, «л» — льготный, «п» — пиковый, «ш» — штрафной). На правом поле индикатора отображается текущая дата, день недели и сезонное время («летнее/зимнее»). Текущий тариф, по которому производятся накопления, отображается на тарифной зоне ЖКИ (левое верхнее поле индикатора). При превышении установленных ограничений по мощности или по количеству потребленной за месяц энергии высвечиваются соответственно «лимит мощности» или «лимит энергии».

Просмотр информации по предыдущим 11 месяцам производится при нажатии специально предусмотренной кнопки на корпусе счетчика. При каждом нажатии последовательно выводится информация о каждом тарифе соответствующего месяца, после чего происходит переход на предыдущий месяц, и процесс повторяется. Просматриваемый месяц и год отображаются на индикаторе даты. Если нажатия кнопки не происходит несколько секунд, счетчик возвращается в нормальный режим работы. При подключении картридера эта кнопка позволяет просмотреть количество энергии по каждому тарифу, имеющееся в распоряжении у пользователя.

На символьном поле индикатора кроме знаков тарифов выводится дополнительная информация, например, при считывании электронной карточки или при обнаружении неисправности программой тестирования, которая периодически запускается для проверки узлов счетчика (энергонезависимого ОЗУ/таймера, встроенного ОЗУ и памяти программ).

На реализацию алгоритма управления счетчиком потребовалось 10 Кбайт адресного пространства, в то время как встроенное ПЗУ микроконтроллера имеет объем 12 Кбайт.

Схемотехнически устройство разделено на две части: управляющий и силовой модули. В силовой модуль входят датчики тока и напряжения, микросхема-преобразователь КР1095ПП1 с оптронной развязкой частотного выхода и модуль питания, выполненный по схеме однотактного импульсного преобразователя на базе микросхемы МС33363 фирмы *Motorola*. Ее отличительной особенностью является наличие встроенного силового ключа для непосредственного управления импульсным трансформатором. Размеры платы силового модуля (с местом под токовый

трансформатор и клеммы подключения сети и нагрузки) — 124 × 154 мм.

Основу модуля управления составляет микроконтроллер MC68HC05L16, позволяющий непосредственное подключение ЖКИ с количеством сегментов до 156, что исключает необходимость использования дополнительного контроллера ЖКИ. В качестве монитора питания, формирующего сигнал сброса микроконтроллера при значении напряжения питания ниже определенного уровня, используется микросхема MC33164. Функции таймера и накопителя оперативной информации выполняет 2-выводная микросхема фирмы Dallas DS1994L, имеющая встроенный долговременный источник питания (литиевая батарея). Согласователь уровней для обмена информацией с внешними устройствами выполнен на микросхеме MAX487EPA. Печатная плата модуля управления имеет размеры 100 × 80 мм, соединение с силовым модулем осуществляется через гибкий шлейф.

Серийно производятся однофазные многотарифные СЭ серии «Меркурий 200», в которых реализуются описанные выше возможности электронных счетчиков.

Применение аналогичных схемотехнических решений дает возможность создания трехфазных счетчиков (применяя соответствующие преобразователи мощность—частота), а также совмещенных СЭ для нескольких потребителей (один такой счетчик может обслуживать, например, целый этаж жилого дома). Построение этих устройств также можно осуществлять, используя простые и недорогие микроконтроллеры. Однако тенденции развития микроэлектроники ведут к тому, что в скором времени станет выгодно применять и более сложные микроконтроллеры, увеличивая тем самым функциональные возможности СЭ. В любом случае, учитывая преимущества цифровых счетчиков перед электромеханическими, можно не сомневаться, что переход на них — вопрос ближайшего будущего.

Контрольные вопросы

1. Может ли индукционный счетчик использоваться в цепях постоянного тока?
2. Чем вызвана необходимость внедрения электронных счетчиков?
3. По каким направлениям ожидается модернизация электронных счетчиков?

Глава 13 ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА, ЧАСТОТЫ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

13.1. Измерение фазового сдвига

Фазой гармонического напряжения $U(t) = U \sin(\omega t + \varphi_0)$ называется аргумент функции $U(t)$, описывающей колебательный процесс. Фаза гармонического напряжения является линейной функцией времени. Угол сдвига фаз представляет собой модуль разности фаз двух гармонических сигналов $U_1(t)$ и $U_2(t)$ одинаковой частоты. Таким образом, если $U_1(t) = U_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$, а $U_2(t) = U_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$, то согласно определению угол сдвига фаз есть $\Delta\varphi = |\varphi_1 - \varphi_2|$.

Если φ_1 и φ_2 постоянны во времени, то $\Delta\varphi$ от времени не зависит. При $\Delta\varphi = 0$ гармонические напряжения называются синфазными, при $\Delta\varphi = \pm\pi$ — противофазными. Выбор метода измерения угла сдвига фаз зависит от диапазона частот, амплитуды сигнала и, главным образом, от требуемой точности измерения. Измерение угла сдвига фаз может выполняться как методом непосредственной оценки, так и методом сравнения. Результат измерения выражается либо в градусах, либо в радианах. Измерительные приборы, специально предназначенные для измерения угла сдвига фаз, называются фазометрами. Угол сдвига фаз может быть измерен также с помощью осциллографа.

Измерение фазового сдвига между напряжением и током нагрузки на промышленной частоте, между двумя гармоническими

напряжениями (например, входным и выходным напряжениями четырехполюсника, усилителя) в зависимости от частоты, между двумя периодическими напряжениями одинаковой частоты любой формы — эти задачи часто встречаются в исследовательской и производственной практике.

Электромеханические фазометры. Электродинамические и ферродинамические логометры могут быть использованы для построения фазометров (как показывающих, так и самопишущих), предназначенных для измерения фазового сдвига между напряжением и током в нагрузке и коэффициента мощности.

Электрическая схема электродинамического фазометра и соответствующая ей векторная диаграмма представлены на рис. 13.1.

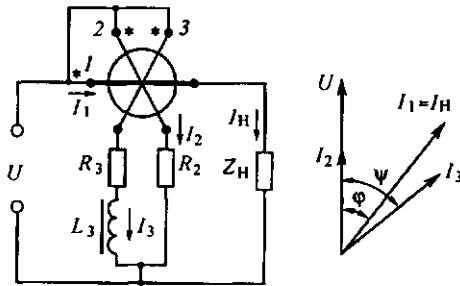


Рис. 13.1. Электродинамический фазометр

Подвижная часть механизма, представляющая две жестко скрепленные между собой под углом 60° рамки, крепится на осях и опорах. Механический противодействующий момент в механизме отсутствует. Взаимодействие тока I_1 ($I_1 = I_H$), протекающего по неподвижной катушке прибора I , с током I_2 , протекающим по обмотке рамки 2, угол между плоскостью которой и плоскостью неподвижной катушки равен 150° при $\alpha = 0$, создает вращающий момент

$$M_1 = c_1 I_1 I_2 \cos(I_1, I_2) \sin(150^\circ - \alpha).$$

Взаимодействие тока I_1 с током I_3 создает вращающий момент M_2 , который действует навстречу моменту M_1 :

$$M_2 = c_2 I_1 I_3 \cos(I_1, I_3) \sin(150^\circ - 60^\circ - \alpha).$$

Из векторной диаграммы следует, что $\cos(I_1, I_2) = \cos \varphi$.

Фазовый сдвиг между U (или I_2) и током I_3 выполняется равным $\psi = 60^\circ$ за счет включения в цепь обмотки рамки 3 катушки индуктивности L_3 и резистора R_3 , таких, что $\cos(I_1, I_3) = \cos(60^\circ - \varphi)$. В установившемся режиме подвижная часть прибора займет положение, при котором $M_1 = M_2$, поэтому

$$c_1 I_1 I_2 \cos(\varphi) \cos(60^\circ - \alpha) = c_2 I_1 I_3 \cos(\alpha) \cos(60^\circ - \alpha).$$

Если выполняется условие $c_1 I_2 = c_2 I_3$, то последнее равенство будет выполняться при $\alpha = \varphi$. Таким образом, угол поворота подвижной части равен фазовому сдвигу между напряжением и током в нагрузке. Прибор имеет линейную шкалу. Его показания практически не зависят от нестабильности напряжения на нагрузке (в пределах 10...20%). Недостатками таких фазометров являются сравнительно большая потребляемая мощность (5...10 В·А) и зависимость показаний от частоты.

Шкала рассмотренного фазометра может быть проградуирована также в значениях коэффициента мощности, т. е. в значениях $\cos \varphi$.

У лабораторных фазометров погрешность не превышает 0,5%. На основе электродинамических механизмов возможно построение фазометров для измерения $\cos \varphi$ и в трехфазных цепях переменного тока. Схема включения фазометра в этом случае приведена на рис. 13.2.

По принципу действия он подобен однофазному фазометру, но необходимые фазовые сдвиги между токами в обмотках рамок подвижной части прибора можно получить проще, используя 120-градусные сдвиги между напряжениями и токами трехфазной цепи. Такой прибор дает правильные показания в трехфазной цепи с симметричными напряжениями и токами. В случае несимметричной трехфазной цепи можно говорить лишь о разности фаз между током и напряжением в каждой фазе.

Электронный фазометр. Измерение фазового сдвига между двумя периодическими напряжениями (одной частоты) в диапазоне частот до 1 МГц производится с помощью электронных фазометров. Структурная схема электронного фазометра приведена на рис. 13.3.

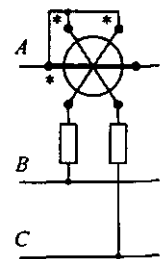


Рис. 13.2. Трехфазный электродинамический фазометр

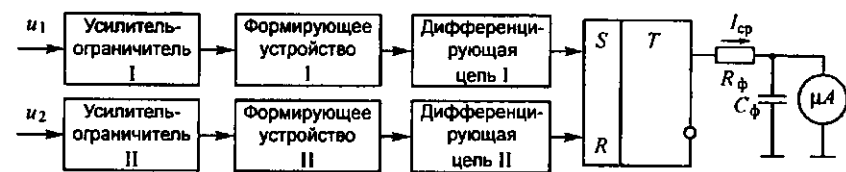


Рис. 13.3. Структурная схема электронного фазометра

Напряжения u_1 и u_2 (одно из них является опорным, например u_1) подаются на два входа прибора (рис. 13.4, *a* и *б*). В обоих каналах напряжения усиливаются и, если их амплитуды достаточно большие, ограничиваются усилителями-ограничителями; затем с помощью формирующих устройств эти напряжения преобразуются в напряжения прямоугольной формы с крутыми фронтами (рис. 13.4, *в* и *г*). Фазовый сдвиг напряжений на выходах формирующих устройств равен фазовому сдвигу входных напряжений. Дифференцирующими цепями формируются короткие импульсы, поступающие на входы триггера T (рис. 13.4, *д* и *е*). Когда импульс с дифференцирующей цепи I попадает на вход S , на выходе триггера появляется высокий потенциал (логическая единица). После прихода импульса на вход S никакие другие события на этом входе не могут изменить состояние триггера. Перебросить триггер в другое устойчивое состояние может импульс с дифференцирующей цепи II, который попадет на вход R , и на выходе появляется низкий потенциал (логический ноль), этот уровень напряжения сохраняется до прихода следующего импульса на вход S .

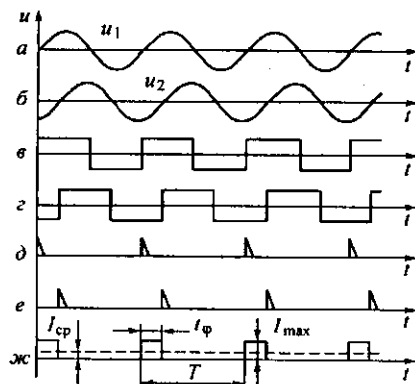


Рис. 13.4. Временные диаграммы работы электронного фазометра

Выходное напряжение триггера T показано на рис. 13.4, *ж*. К выходу триггера T подключен магнитоэлектрический микроамперметр. Длительность импульса t_ϕ на выходе триггера T связана с фазовым сдвигом следующим соотношением: $t_\phi = \varphi_x / 2\pi f_c$, где f_c — частота сигналов. Тогда среднее значение тока, протекающего через прибор, есть $I_{cp} = I_{max} t_\phi / T_c$, где I_{max} — амплитуда импульса тока; $T_c = 1/f_c$ — период входных напряжений. Нетрудно видеть, что

$$I_{cp} = I_{max} \varphi_x / 2\pi.$$

Таким образом, шкала прибора линейна и не зависит от частоты. Цепочка $R_\phi C_\phi$ уменьшает дрожание стрелки микроамперметра. Электронные фазометры работают в широком диапазоне частот, имеют большое входное сопротивление (малую потребляемую мощность от источников сигналов).

В основе работы *цифровых фазометров* всех систем лежит принцип преобразования измеряемого угла сдвига фаз во временной интервал, длительность которого пропорциональна значению измеряемой величины. Длительность временного интервала определяется при этом методом дискретного счета непосредственно, или с промежуточным преобразованием длительности временного интервала в пропорциональное ему значение величины напряжения постоянного тока.

Фазометры с непосредственным преобразованием значения длительности временного интервала в код в свою очередь подразделяются на две группы: с измерением за время одного периода входных напряжений и с измерением в течение нескольких периодов. Фазометры первой группы называются фазометрами мгновенного значения, а второй группы — фазометрами среднего значения. Фазометры среднего значения, называемые также фазометрами с постоянным временем измерения, благодаря хорошим характеристикам получили наибольшее распространение. На рис. 13.5 приведена структурная схема такого фазометра, а временные диаграммы его работы показаны на рис. 13.6.

Входные синусоидальные напряжения u_1 и u_2 с помощью формирующих устройств преобразуются в периодические последовательности коротких импульсов, сдвинутые относительно друг друга на временной интервал $\Delta T = \frac{\Delta\varphi}{2\pi} T$. Эти импульсы, по-

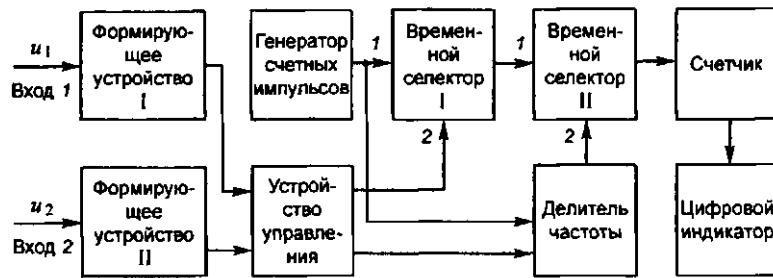


Рис. 13.5. Структурная схема цифрового фазометра

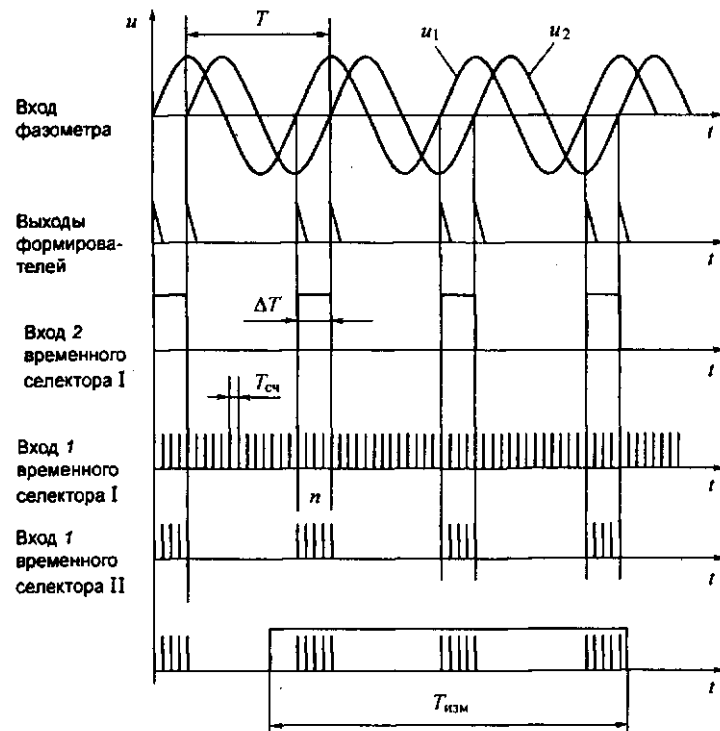


Рис. 13.6. Временные диаграммы работы цифрового фазометра

падающая на два входа устройства управления, формирует на его выходе последовательность прямоугольных импульсов длительностью ΔT и с периодом следования T . Полученные прямоугольные импульсы подаются на вход 2 (управляющий) временного

селектора I, а на его вход 1 (сигнальный) подается последовательность коротких импульсов с выхода генератора счетных импульсов, период следования которых равен $T_{сч}$.

В результате на выходе временного селектора I формируется последовательность пачек счетных импульсов (см. рис. 13.4). При условии, что $\Delta T > T_{сч}$ число импульсов n в каждой пачке, без учета погрешностей, есть:

$$n = \frac{\Delta T}{T_{сч}} = \frac{\Delta \varphi T}{2\pi T_{сч}}. \quad (13.1)$$

Эти пачки счетных импульсов подаются, в свою очередь, на вход 1 временного селектора II. На его вход 2 с выхода формирователя, в качестве которого работает делитель частоты, подается прямоугольный импульс длительностью $T_{изм}$. В результате, на выходе временного селектора II образуется конечная последовательность пачек счетных импульсов.

Длительность одного цикла измерений $T_{изм}$ выбирается так, чтобы

$$T_{изм} \gg T_{нижн}, \quad (13.2)$$

где $T_{нижн}$ — период самого низкочастотного напряжения, исследуемого фазометром. При выполнении этого условия общее количество счетных импульсов N , попавших на вход счетчика, будет равно:

$$N = n \frac{T_{изм}}{T} = \frac{\Delta \varphi T_{изм}}{2\pi T_{сч}}. \quad (13.3)$$

Погрешность в определении N будет тем меньше, чем больше число импульсов n в каждой пачке, и чем лучше выполняется условие (13.2).

Код числа N с выхода счетчика поступает на цифровой индикатор.

Если длительность одного цикла измерений выбрать в соответствии с выражением $T_{изм} = \frac{KT_{сч}}{2}$, где K — коэффициент деления частоты, то выражение (13.3) можно записать в виде:

$$N = n \frac{T_{изм}}{T} = \frac{\Delta \varphi T_{изм}}{2\pi T_{сч}} = \frac{\Delta \varphi K}{2\pi \cdot 2} = \frac{K\Delta \varphi}{720^\circ}. \quad (13.4)$$

Значение K выбирают, как правило, из условия $K = 720 \times 10^m$, где $m = 0; 1; 2$ и т. д. В этом случае значение угла сдвига фаз есть:

$$\Delta\varphi = 10^{-m} N = qN,$$

где q — значение единицы младшего разряда цифрового отсчетного устройства фазометра.

При $m = 0$ имеем $q = 1^\circ$; при $m = 1$ имеем $q = 0,1^\circ$; при $m = 2$ — соответственно $q = 0,01^\circ$ и т. д.

Видно, что такой цифровой фазометр является прямопоказывающим, это одно из его достоинств. Особенность цифрового фазометра с усреднением состоит в том, что его погрешность дискретизации имеет две составляющие: одна связана с ограниченным числом импульсов в каждой пачке, а другая — с ограниченным числом пачек, попадающих в интервал $T_{изм}$. С изменением частоты входных напряжений влияние этих двух составляющих погрешности дискретизации изменяется в противоположных направлениях. С увеличением частоты количество импульсов в каждой пачке уменьшается, но количество подсчитанных пачек возрастает, с уменьшением частоты происходит противоположный процесс. Возрастание одной составляющей погрешности дискретности при уменьшении n лимитирует верхнюю границу частотного диапазона фазометра, а возрастание другой составляющей при уменьшении числа пачек — нижнюю границу.

Оциллографические методы измерения фазы. Среди оциллографических методов наибольшее распространение получили методы линейной развертки и эллипса.

Метод линейной развертки предполагает применение двухлучевого осциллографа или однолучевого осциллографа с электронным коммутатором. В этом случае на экране осциллографа создается изображение двух напряжений (рис. 13.7), фазовый сдвиг φ_x

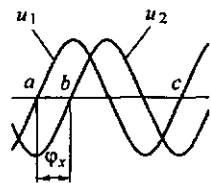


Рис. 13.7. Измерение фазы методом линейной развертки

между которыми необходимо измерить. Если напряжения u_1 и u_2 на вход Y осциллографа подаются через электронный коммутатор, то изображения создаются штриховыми линиями (частота коммутации значительно выше частоты напряжений u_1 и u_2). По измеренным отрезкам ab и ac вычисляется

$$\varphi_x = ab \cdot 360^\circ / ac.$$

Причиной погрешности измерения в данном случае является прежде всего неточность измерения отрезков ab и ac .

Метод эллипса используется для измерения фазового сдвига между синусоидальными напряжениями. Напряжения u_1 и u_2 подаются на входы каналов Y и X (канал X работает в режиме усиления сигнала u_2). На экране осциллографа получается изображение эллипса (рис. 13.8).

Если $u_1 = u_Y = u_{Y\max} \sin \omega t$ и $u_2 = u_X = u_{X\max} \sin(\omega t + \varphi_x)$, то в момент $t = 0$ пятно будет находиться в точке a или b , т. е. l_{ab} пропорционален $2u_{X\max} \sin \varphi$. Отрезок l_{cd} , соответствующий максимальному отклонению луча по оси X , пропорционален $2u_{X\max}$. Следовательно, $\sin \varphi_x = ab/cd$ и $\varphi_x = \arcsin(ab/cd)$. Метод эллипса позволяет измерять φ_x в пределах $0 \dots 90^\circ$ без определения знака фазового угла. Причинами погрешности измерения являются неточность измерения отрезков и неодинаковый фазовый сдвиг в каналах X и Y .

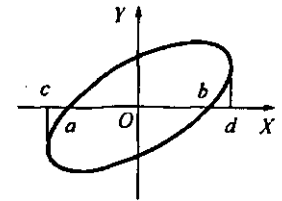


Рис. 13.8. Измерение фазового сдвига методом эллипса

13.2. Измерение частоты

Основным параметром периодических процессов является частота f , определяемая числом колебаний за 1 с. Время одного колебания — период $T = 1/f$. Следовательно, измерения частоты тесно связаны с измерениями времени.

Характерной особенностью измерений частоты и времени является высокая точность. В современной измерительной технике никакие другие величины не определяют с такой малой относительной погрешностью, достигающей 10^{-11} , как частоту и временной интервал.

Частоту определяют прямым отсчетом по шкале частотомеров, имеющих различные принципы действия и конструкции.

Электромеханические частотомеры. Эти приборы используются для измерения частот в диапазоне $20 \dots 2500$ Гц в основном в энергетических цепях и выполняются на основе электромагнитных и электродинамических (ферродинамических) механизмов.

Наиболее простым из электромеханических частотомеров является электромагнитный резонансный (вибрационный) частото-

томер. Электромагнитные механизмы нашли применение для изготовления частотомеров, предназначенных для контроля частот 50 и 400 Гц. Частотомер, устройство которого показано на рис. 13.9, *а* состоит из электромагнита 1 с сердечником 2, на обмотку которого подается напряжение с измеряемой частотой. В поле электромагнита находится якорь 3, скрепленный с планкой 5, на которой укреплен ряд стальных пластинок 4 с различными собственными частотами резонанса (рис. 13.9, *б*). Пружинные опоры 6 позволяют якорю и пластинкам 4 совершать вынужденные колебания с удвоенной частотой напряжения. При этом наибольшую амплитуду будет иметь та пластинка, у которой частота собственных колебаний совпадает с частотой второй гармоники вынужденных колебаний (рис. 13.9, *в*).

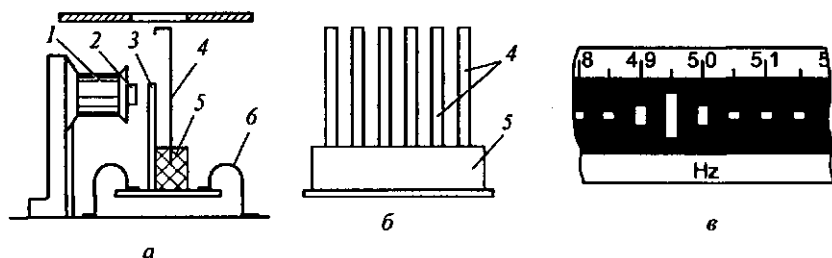


Рис. 13.9. Резонансный частотомер: 1 — обмотка электромагнита; 2 — сердечник; 3 — якорь; 4 — стальная пластинка; 5 — скрепляющая планка; 6 — пружина опоры

Погрешность резонансных частотомеров составляет около 1%. Она определяется размером пластинок и их числом. К достоинствам рассматриваемых приборов относятся их простота и удобство в эксплуатации. Недостатки — узкие пределы измерения (например, 45...55 Гц, 350...450 Гц) и невозможность использования на подвижных объектах из-за появления паразитных механических вибраций.

Электрическая схема *электродинамического частотомера* на основе логометрического механизма и векторная диаграмма токов приведены на рис. 13.10.

Рамки подвижной части частотомера скреплены между собой под углом 90°. Параметры контура L_3 , C_3 и R_3 подобраны таким образом, что частота резонанса напряжений близка к средней частоте диапазона измерения $f_{cp} = (f_n + f_k)/2$, где f_n и f_k — соответственно начальное и конечное значения шкалы прибора.

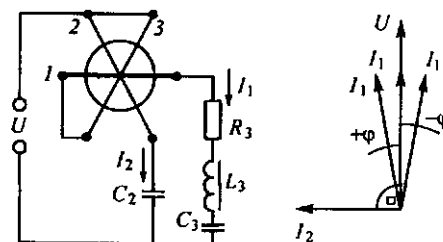


Рис. 13.10. Электродинамический частотомер

Вращающие моменты, действующие на подвижную часть, равны:

$$M_1 = c_1 I_1 I_2 \sin(\beta_1 - \alpha) \cos(90^\circ \pm \varphi) = c_1 I_1 I_2 \cos(45^\circ - \alpha) \sin(\pm \varphi);$$

$$M_2 = c_2 I_1^2 \sin(\beta_2 - \alpha) \cos 0^\circ = c_2 I_1^2 \sin(45^\circ - \alpha),$$

где $\beta_1 = 135^\circ$, $\beta_2 = 45^\circ$ — соответственно углы между плоскостями первой и второй рамок и плоскостью неподвижной катушки при $\alpha = 0$.

Момент M_1 зависит от угла поворота подвижной части α и фазового сдвига между токами I_1 и I_2 , который, в свою очередь, зависит от измеряемой частоты f_x . Момент M_2 зависит только от угла α и не зависит от частоты f_x . Моменты M_1 и M_2 действуют навстречу друг другу, и подвижная часть поворачивается до тех пор, пока не наступает равенство $M_1 = M_2$. Токи I_1 и I_2 с изменением измеряемой частоты изменяются незначительно, и поэтому из равенства моментов следует:

$$\operatorname{tg}(45^\circ - \alpha) = c \sin(\pm \varphi).$$

Так как $\varphi = \Psi(f_x)$, то $\alpha = F(f_x)$. Из последнего равенства следует, что при $f_x = f_{cp}$ ($\varphi = 0$) $\alpha = 45^\circ$. При $f_x = f_n$ стрелка займет крайнее левое положение, а при $f_x = f_k$ — крайнее правое.

Цифровые частотомеры и периодомеры.

Структурная схема цифрового частотомера показана на рис. 13.11, *а*.

Напряжение измеряемой частоты f_x произвольной формы подается на вход усилителя-ограничителя УО, в котором оно преобразуется в прямоугольные импульсы напряжения той же частоты f_x и подается на электронный ключ ЭК. Ключ ЭК в нор-

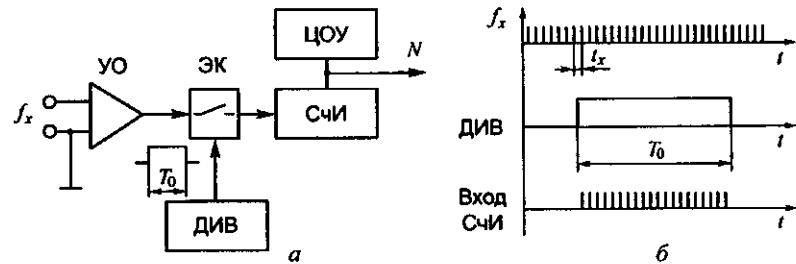


Рис. 13.11. Цифровой частотомер: *a* — структурная схема; *б* — временная диаграмма работы

мальном состоянии разомкнут, но при подаче импульса напряжения длительностью T_0 от датчика интервала времени ДИВ ключ ЭК замыкается, и импульсы с выхода УО поступают на вход счетчика импульсов СЧИ, в котором они подсчитываются. По окончании импульса T_0 ключ ЭК размыкается, на выходных шинах СЧИ формируется код N , соответствующий количеству импульсов напряжения, прошедших на счетчик СЧИ. Этот код подается на цифровое отсчетное устройство ЦОУ, где отображается в виде цифр, а также поступает на выход частотомера для передачи во внешние устройства.

На рис. 13.11, *б* показана временная диаграмма напряжений, действующих в схеме: на выходе УО (f_x), на выходе ДИВ (T_0) и на входе СЧИ.

Если обозначить через t_x период импульсов частоты f_x , то количество импульсов N , прошедших на счетчик СЧИ за время T_0 , будет равно:

$$N = T_0 / t_x = T_0 f_x$$

При постоянном и стабильном значении T_0 код N прямо пропорционален f_x . Точность измерения частоты f_x зависит от точности задания интервала T_0 . Современные цифровые частотомеры в качестве датчика интервала времени содержат высокочастотный кварцевый генератор, снабженный делителем частоты, на выходе которого и получают импульсы с периодом T_0 . Стабильность частоты кварцевых генераторов очень высока: изменение частоты после ее подстройки не превышает 10^{-7} за 10 дней, поэтому цифровые частотомеры позволяют измерять частоту и связанные с ней величины с очень высокой точностью, а отсчетные устройства частотомеров содержат до семи декад.

Схема рис. 13.11, *а* принципиально пригодна для измерения частоты во всем диапазоне: от нуля до максимального значения. Однако измерение низких частот по этой схеме требует длительного времени измерения. Например, пусть требуется точно измерить значение частоты $f_x \approx 100$ Гц частотомером с семидекадным отсчетным устройством. При точном измерении предполагается, что первая значащая цифра результата измерения должна быть в старшей декаде отсчетного устройства. В нашем примере для выполнения этого условия на вход частотомера надо пропустить 10^6 импульсов и затратить на это время $T_0 = 10^6 / f_x = 10^4$ с ≈ 3 ч. Время измерения можно сократить без потери точности, если перейти к измерению не частоты, а периода. Схема периодомера показана на рис. 13.12. Она содержит генератор высокой частоты ГВЧ, электронный ключ ЭК, два счетчика импульсов СЧИ и СЧИ1, цифровое отсчетное устройство ЦОУ, усилитель-ограничитель УО, а также переключатель SA.

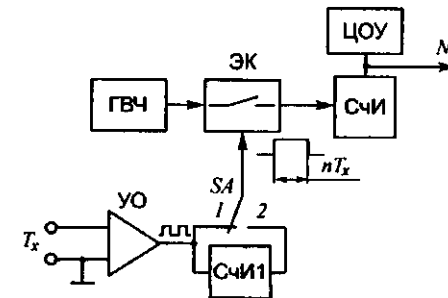


Рис. 13.12. Структурная схема цифрового периодомера

Напряжение произвольной формы, период которого T_x измеряется, преобразуется усилителем-ограничителем УО в прямоугольные импульсы с периодом T_x . Если переключатель SA находится в позиции 1, то импульс с выхода УО замкнет ключ ЭК на время, равное T_x , при этом от ГВЧ на СЧИ пройдет N импульсов с периодом t_0 . Значение $T_x = N t_0$ может оказаться недостаточным для того, чтобы первая значащая цифра отсчетного устройства ЦОУ появилась в старшем разряде. Время замкнутого состояния ключа ЭК можно увеличить, поставив переключатель SA в позицию 2. В этом случае импульс управления ЭК формируется счетчиком СЧИ и равен $n T_x$, где n — коэффициент пересчета счетчика СЧИ.

Структурная схема частотомера позволяет без существенных переделок путем простых переключений использовать его:

- для измерения длительности импульсов и интервалов времени; в этом случае измеряемая величина подается на вход усилителя-ограничителя УО в схеме рис. 13.12, а переключатель SA переводится в позицию I;
- для измерения отношения частот, когда (см. рис. 13.11) напряжение с частотой f_1 подается на вход УО, а напряжение с частотой $f_2 < f_1$ используется для управления ключом ЭК (датчик интервала времени ДИВ отключается), $N = f_1/f_2$;
- в качестве генератора кратных эталонных частот, которые создаются кварцевым генератором и делителем частоты.

13.3. Электромагнитная совместимость.

Измерение показателей качества электрической энергии

Измерение показателей качества электрической энергии требуется для соблюдения ГОСТ 13109—97 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств

электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Любые устройства, использующие электромагнитные явления (устройства усиления, переключения, преобразования), изменяют вокруг себя электромагнитную обстановку, иногда создавая недопустимые помехи для работы теле- и радиоприемников, систем навигации, дистанционного управления, вычислительной техники и других технических средств (ТС).

Электромагнитная совместимость (ЭМС) — способность технических средств работать по своему прямому назначению в номинальном режиме, не создавая недопустимых помех.

Электромагнитная помеха — любое электромагнитное явление, способное вызвать нарушение работы ТС.

Электромагнитная совместимость нарушается, если уровень помех слишком высок или помехоустойчивость оборудования недостаточна. В этом случае возможно нарушение в работе компьютеров, выдача ложных команд в системах управления, навигации, что может привести к авариям с тяжелыми последствиями.

В странах ЕС действует директива 336ЕС89. С 1996 г. в Европе не допускается продажа технических средств без сертификата соответствия стандартам по электромагнитной совместимости. В России подлежит обязательной сертификации по ЭМС различное электротехническое и электронное оборудование (компьютеры, контрольно-кассовые машины, медицинская техника и др.). Сертификат выдается на основе протокола испытаний, проведенных в аккредитованной лаборатории. Испытания включают проверку устойчивости ТС к помехам со стандартными параметрами и проверку на допустимые уровни создаваемых помех.

Отклонение показателей качества за установленные пределы ведет к увеличению потерь электроэнергии и мощности в электрических сетях. Потери мощности в сети и в электрооборудовании изменяются в зависимости от значения напряжения. Нагрузочные потери в линиях и трансформаторах пропорциональны квадрату тока и обратно пропорциональны квадрату напряжения. Потери холостого хода пропорциональны квадрату напряжения.

Искажение симметрии и синусоидальности токов и напряжений приводит к дополнительным потерям мощности в линиях, трансформаторах, вращающихся машинах и батареях конденсаторов; появление высокочастотных гармоник приводит к излучению помех в радиодиапазонах.

Установлены два вида норм качества электроэнергии: нормально допустимые и предельно допустимые. Согласно ГОСТ 13109—97 показателями качества электроэнергии являются:

1. *Отклонение напряжения* характеризуется показателем установившегося (длящегося более одной минуты) напряжения, для которого установлены следующие нормы: нормально допустимые и предельно допустимые значения установившегося отклонения напряжения ΔU , на выводах приемников электрической энергии равны соответственно +5 и +10 % от номинального напряжения электрической сети.

2. *Колебания напряжения* (кратковременное отличие от номинального) характеризуются размахом изменения напряжения и дозой фликера. Фликер — субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей эти источники. Доза фликера — мера восприимчивости человека к воздействию фликера за установленный промежуток времени.

3. Несинусоидальность напряжения (рис. 13.13, а) характеризуется коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения и коэффициентом n -й гармонической составляющей напряжения.

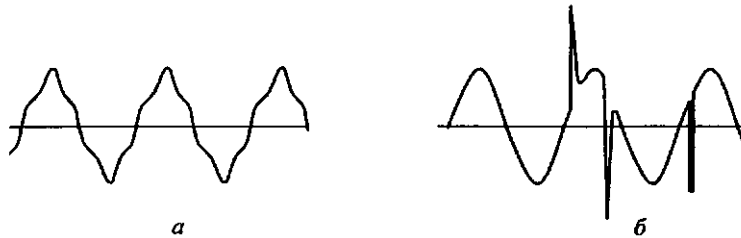


Рис. 13.13. Искажения формы напряжения: а — несинусоидальность; б — импульсы напряжения

4. Несимметрия напряжения.

5. Отклонение частоты напряжения переменного тока в электрических сетях характеризуется показателем отклонения частоты. Нормально допустимое и предельно допустимое значения отклонения частоты равны $\pm 0,2$ и $\pm 0,4$ Гц соответственно.

6. Провал напряжения характеризуется показателем длительности провала напряжения, для которого установлена следующая норма: предельно допустимое значение длительности провала напряжения в электрических сетях напряжением до 20 кВ включительно равно 30 с. Длительность автоматически устраняемого провала напряжения в любой точке присоединения к электрическим сетям определяется выдержками времени релейной защиты и автоматики.

7. Импульс напряжения (рис. 13.13, б) характеризуется показателем импульсного напряжения. Значения импульсных напряжений для грозовых и коммутационных импульсов, возникающих в электрических сетях энергоснабжающей организации, приведены в ГОСТ 13109—97.

8. Временное перенапряжение характеризуется показателем коэффициента временного перенапряжения. Значения коэффициентов временных перенапряжений приведены в ГОСТ 13109—97.

Главгосэнергонадзором утвержден руководящий документ (РД) определяющий правила оценки качества показателей электроэнергии. В таблице представлены требования документа РД 153-34.0-15.501—00.

Таблица

Наименование измеряемой величины	Диапазон измерений в единицах измеряемой величины	Предел абсолютной допускаемой погрешности в единицах измеряемой величины	Предел относительной допускаемой погрешности, %	Интервал усреднения, с
Установившееся отклонение напряжения, %	От -20 до +20	$\pm 0,2^*$ $\pm 0,5^{**}$	—	60
Коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения, %	От 0 до 15	$\pm 0,05$ при $K_{U(n)} < 1$	$\pm 0,05$ при $K_{U(n)} > 1$	3
Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения, %	От 0 до 15	$\pm 0,1$ при $K_U < 1$	$\pm 0,1$ при $K_U > 1$	3
Коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности, %	От 0 до 5	$\pm 0,2^*$ $\pm 0,3^{**}$	—	3
Коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности, %	От 0 до 5	$\pm 0,2^*$ $\pm 0,5^{**}$	—	3
Отклонение частоты, Гц	От 49 до 51	$\pm 0,03$	—	20
Длительность провала напряжения, с	От 0,01 до 60	0,01	—	—

* Для средств измерений, подключаемых к выходам измерительных трансформаторов напряжения.

** Для средств измерений, подключаемых непосредственно к электрическим сетям 380 В, 220 В.

Документом РД 153-34.0-15.502—2002 «Методические указания по контролю и анализу качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» для оперативного контроля рекомендуется измеритель показателей качества электрической энергии «Ресурс-UF2».

Измеритель «Ресурс-UF2» предназначен для измерения характеристик напряжения, включая основные показатели качества электрической энергии (ПКЭ), а также характеристик тока, мощности и энергии переменного трехфазного и однофазного тока при работе как в автономном режиме, так и в составе информационно-измерительных систем.

Область его применения включает измерение показателей качества, организация учета количества электроэнергии на пред-

приятиях промышленности и в энергосистемах; обследование электросетей предприятий (энергоаудит); учет потоков мощности в энергосистемах, межсистемных перетоков, выработки и использования электроэнергии.

Структурная схема измерителя представлена на рис. 13.14. В состав измерителя входят:

- блок измерения напряжения (БИН);
- блок измерения тока (БИТ);

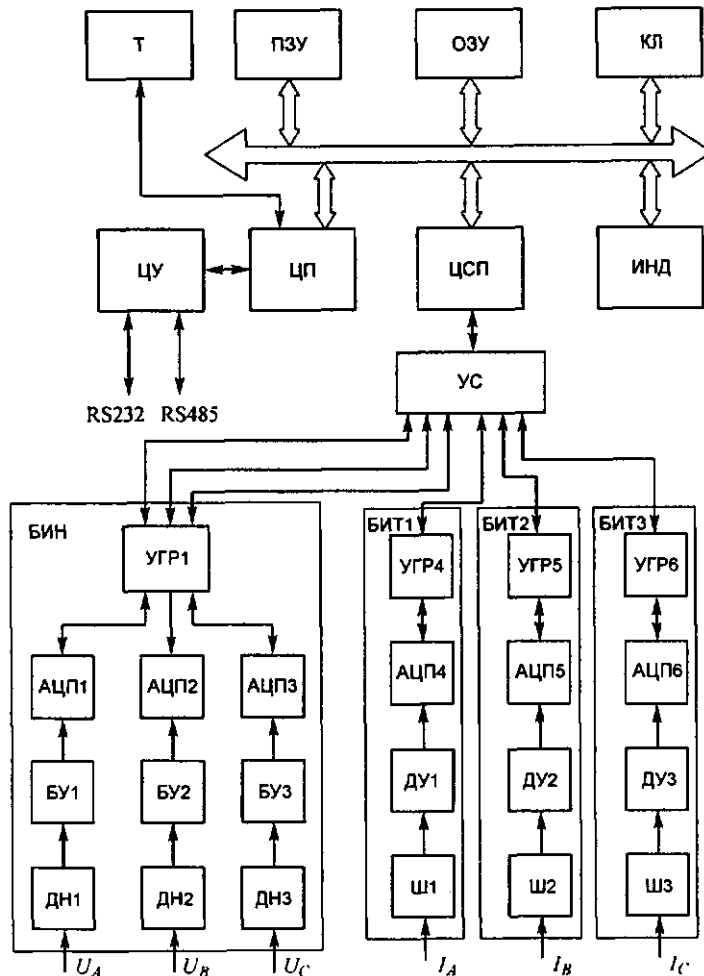


Рис. 13.14

- устройства гальванической развязки (УГР);
- устройство согласования (УС);
- цифровой сигнальный процессор (ЦСП);
- блок питания (БП);
- центральный процессор (ЦП);
- постоянное запоминающее устройство (ПЗУ);
- оперативное запоминающее устройство (ОЗУ);
- таймер (Т);
- интерфейсный модуль (ИМ);
- индикатор (ИНД);
- клавиатура (КЛ).

Блок измерения напряжения состоит из трех идентичных каналов, в каждом из которых имеются входной делитель напряжения, буферный усилитель, 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь, источник опорного напряжения.

Блок измерения тока состоит из трех одинаковых каналов, гальванически изолированных друг от друга и от остальной части измерителя. В каждом измерительном канале тока имеются измерительные шунты, дифференциальный усилитель, 16-разрядный аналого-цифровой преобразователь, источник опорного напряжения.

Устройство согласования состоит из сдвигового регистра и счетчика. Оно предназначено для ввода ЦСП последовательных кодов поступающих от синхронно работающих АЦП измерительных каналов тока и напряжения.

Цифровой сигнальный процессор предназначен для управления блоками измерения тока и напряжения, а также для обработки измерительной информации, поступающей от АЦП каналов тока и напряжения. ЦСП производит подстройку частоты дискретизации аналого-цифрового преобразования под частоту основной (первой) гармоники входного сигнала таким образом, чтобы за период основной частоты производилось 512 измерений мгновенных значений входных сигналов. На основании полученных значений, через каждый полупериод основной частоты входных сигналов рассчитываются действующие значения первых гармоник напряжений и токов, а также коэффициенты n -х гармонических составляющих напряжений и токов. Кроме этого, ЦСП по мгновенным значениям входных сигналов вычисляет действующие значения напряжений, токов и активной мощ-

ности. Усредненные результаты обработки измерительной информации поступают на центральный процессор.

Центральный процессор (ЦП) управляет работой измерителя.

ЦП загружает программу в ЦСП, получает от него данные, накапливает их в энергонезависимой памяти (ПЗУ), производит статистическую обработку измерительной информации, ЦП управляет 16-символьным индикатором и 8-кнопочной клавиатурой.

Энергонезависимый таймер реального времени ведет календарь и привязывает результаты измерений ко времени.

Конструктивно измеритель состоит из двух плат:

- плата измерения и электропитания;
- плата вычислительная.

На плате измерения и электропитания расположены блоки измерения напряжения и тока, устройства гальванической развязки, блок питания.

На измерительной плате, в отсеке внешних подключений, расположены винтовые клеммные соединители, предназначенные для подключения измерительных кабелей напряжения и тока, а также кабеля электропитания (рис. 13.15). Здесь же расположены сетевые предохранители и винтовые клеммные соединители для подключения линий интерфейсов RS 232 и RS 485.

Доступ к клеммным соединителям открывается после демонтажа съемной крышки, которая пломбируется пользователем после выполнения необходимых подключений. Индикатор и клавиатура закреплены на передней панели измерителя.

В трехфазных сетях (рис. 13.16) «Ресурс-UF2» измеряет следующие величины:

1. Показатели качества электроэнергии (ПКЭ):
 - а) установившееся отклонение напряжения;
 - б) коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;
 - в) коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
 - г) коэффициент искажения синусоидальности напряжения;
 - д) коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения;
 - е) отклонение частоты;
 - ж) длительность провала напряжения;

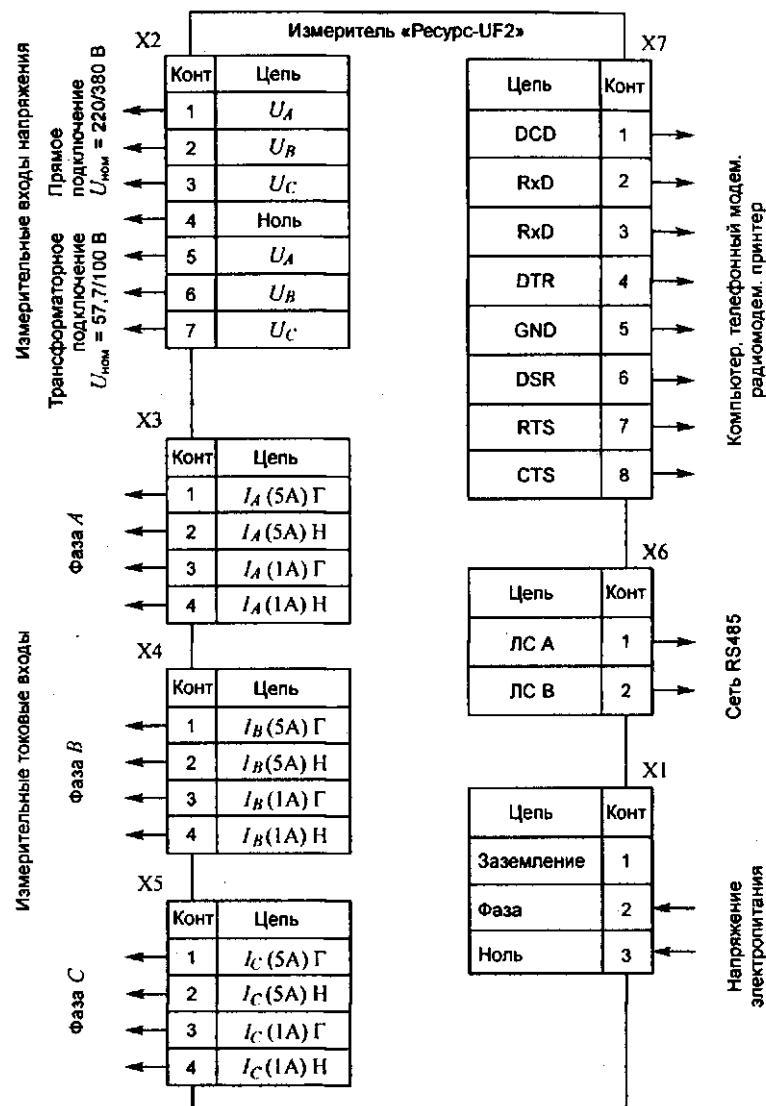


Рис. 13.15. Схема подключения внешних устройств и питания к измерителю «Ресурс-UF2»

- з) длительность временного перенапряжения;
- и) глубина провала напряжения;
- к) коэффициент временного перенапряжения.

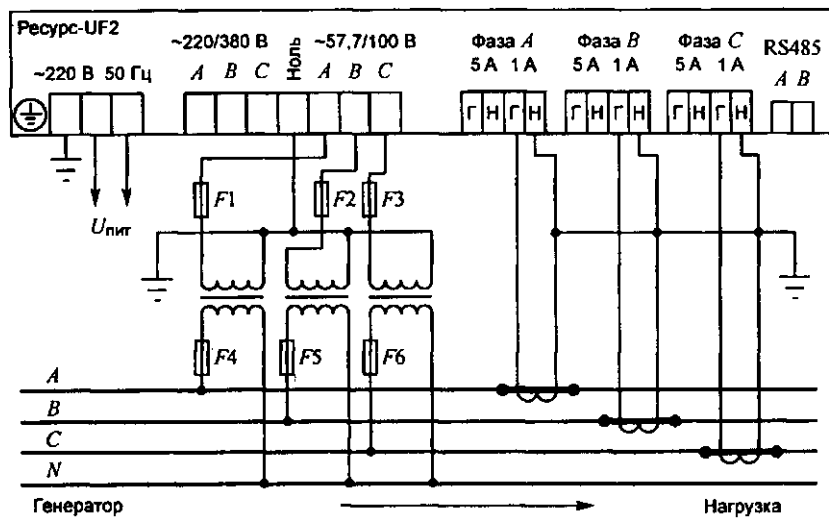


Рис. 13.16. Схема подключения измерителя «Ресурс-UF2» к трехфазной четырехпроводной сети

2. Характеристики напряжения:

- а) действующее значение напряжения;
- б) действующее значение напряжения основной частоты;
- в) действующее значение напряжения прямой последовательности;
- г) значение частоты.

3. Характеристики тока:

- а) действующее значение переменного тока;
- б) действующее значение тока основной частоты;
- в) коэффициент искажения синусоидальности кривой тока;
- г) коэффициент n -й гармонической составляющей тока.

4. Фазовые характеристики:

- а) фазовый угол между фазными напряжениями основной частоты;
- б) фазовый угол между n -ми гармоническими составляющими фазных напряжений;
- в) фазовый угол между фазным током и напряжением основной частоты в каждой из фаз;
- г) фазовый угол между n -ми гармониками фазного тока и напряжения в каждой из фаз.

5. Характеристики мощности по каждой фазе и по трем фазам:

- а) активная мощность;
- б) реактивная мощность;
- в) полная мощность.

6. Характеристики энергии по трем фазам:

- а) активная энергия;
- б) реактивная энергия.

В однофазных сетях «Ресурс-UF2» измеряет следующие величины.

1. Показатели качества электроэнергии (ПКЭ):

- а) установившееся отклонение напряжения;
- б) коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения;
- в) коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения;
- г) отклонение частоты;
- д) длительность провала напряжения;
- е) длительность временного перенапряжения;
- ж) глубина провала напряжения;
- з) коэффициент временного перенапряжения.

2. Характеристики напряжения:

- а) действующее значение напряжения;
- б) действующее значение напряжения основной частоты;
- в) значение частоты.

3. Характеристики тока:

- а) действующее значение тока;
- б) действующее значение тока основной частоты;
- в) коэффициент искажения синусоидальности кривой тока;
- г) коэффициент n -й гармонической составляющей тока;

4. Фазовые характеристики:

- а) фазовый угол между током и напряжением основной частоты (первой гармоники);
- б) фазовый угол между n -ми гармоническими составляющими тока и напряжения.

5. Характеристики мощности:

- а) активная мощность;
- б) реактивная мощность;
- в) полная мощность.

6. Характеристики энергии:

- а) активная энергия;
- б) реактивная энергия.

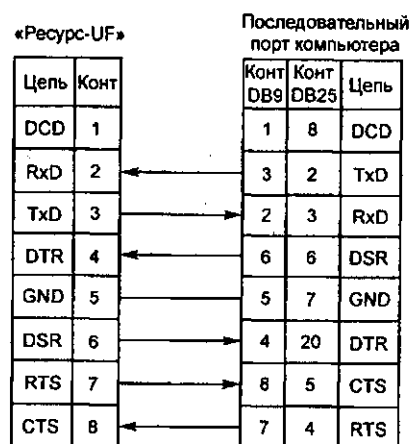


Рис. 13.17. Подключение измерителя «Ресурс-UF2» к последовательному порту компьютера

При работе в автономном режиме оперативное управление и снятие показаний в реальном времени производится с помощью компьютера, подключенного по интерфейсу RS 232 (рис. 13.17).

Контрольные вопросы

1. Какие измерительные механизмы используются в электромеханических фазометрах?
2. В какую величину преобразуется угол сдвига фаз в цифровых фазометрах?
3. Какие осциллографические методы применяются для измерения угла сдвига фаз?
4. Можно ли использовать резонансный частотомер в движущемся транспорте?
5. Почему необходим контроль качества электрической энергии?

Глава 14 ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

14.1. Общие сведения

Создание и эксплуатация современных машин и сооружений, контроль параметров технологических процессов требуют организации измерений большого числа различных физических величин, собираемых множеством датчиков. Решение таких задач традиционными способами — подключением к каждой контролируемой точке индивидуального измерительного прибора (ИП) — просто невозможно уже хотя бы потому, что из-за большого количества приборов оператор не в состоянии следить за их показаниями. Подобного рода трудности возникают и при небольшом числе первичных ИП в случае контроля быстропротекающих процессов. Между тем в задачах такого рода измерительная информация, поступающая от первичных ИП, должна быть собрана, обработана и в удобной форме представлена оператору.

Передача информации осуществляется либо непосредственно через каналы связи (при небольших дистанциях или специально выделенных каналах связи), либо через устройства телемеханики (на большие расстояния). Передача сигналов от многих источников в одно место достигается при помощи устройств централизованного контроля.

К средствам представления информации относятся показывающие стрелочные, цифровые, символьные и др. индикаторы, самопишущие приборы, печатающие устройства и графопостроители. Для лучшего восприятия широко применяется метод визуального контроля с помощью промышленного телевидения, мнемонических схем (рис. 14.1).

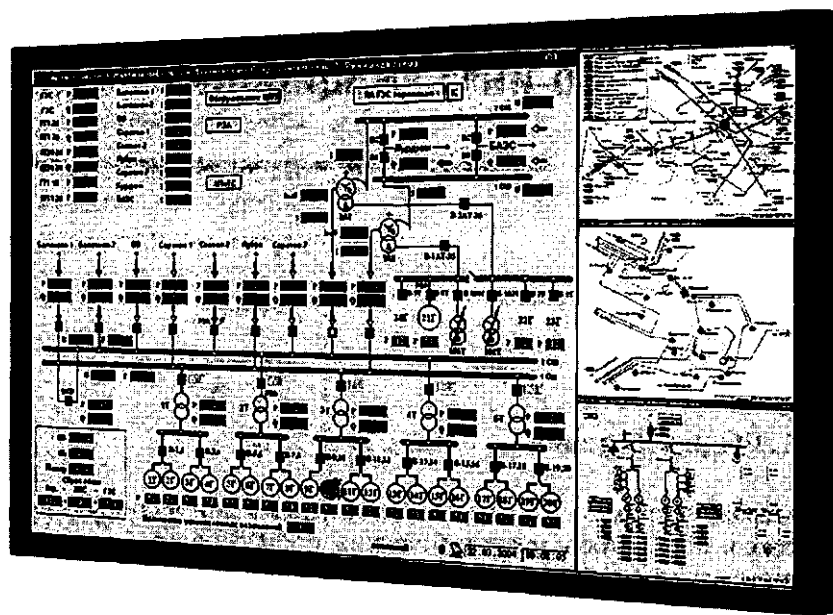


Рис. 14.1. Плазменная панель с мнемонической схемой объекта

При большом количестве информации, необходимости ее предварительного логического и математического анализа или синтеза, в связи с решением сложных экономических, технологических и иных задач, а также при управлении современными технологическими и энергетическими комплексами применяют средства вычислительной техники.

Измерительно-информационная система (ИИС) представляет собой функционально объединенную совокупность средств измерения нескольких физических величин и вспомогательных устройств и предназначена для получения измерительной информации об исследуемом объекте в условиях его функционирования или хранения.

Для того чтобы упорядочить проектирование, производство и освоение ИИС существует *Государственная система промышленных приборов и средств автоматизации (ГСП)*. ГСП состоит из унифицированных элементов, модулей и блоков, допускающих информационное, энергетическое и конструктивное сопряжение в агрегатных комплексах и автоматизированных системах управления.

В зависимости от назначения ИИС подразделяются на:

- системы сбора измерительной информации от исследуемого объекта; такие системы часто называют просто измерительными системами;
- системы автоматического контроля, предназначенные для контроля за работой разного рода машин, агрегатов или технологических процессов;
- системы технической диагностики, предназначенные для выявления технической неисправности различных изделий;
- телеизмерительные системы, предназначенные для сбора измерительной информации с удаленных на большие расстояния объектов.

Важнейшей разновидностью ИИС являются *измерительно-вычислительные комплексы (ИВК)*, получившие применение в последние годы. Так же, как и ИИС, ИВК представляют собой автоматизированные средства измерений и обработки измерительной информации, предназначенные для применения на сложных объектах. Их отличительной чертой является наличие в системе ЭВМ, которая используется не только для обработки результатов измерения, но и для управления самим процессом измерения, а также для управления воздействием (если это необходимо) на объект исследования.

Первоначально ИИС разрабатывались индивидуально для каждой конкретной измерительной задачи, причем всякий раз заново разрабатывались не только структура системы, но и все ее функциональные узлы. Такой подход оказался нерентабельным — срок разработки затягивался, стоимость ИИС была высокой. Поэтому в настоящее время взят курс на агрегатный принцип построения, согласно которому ИИС строится из конструктивно законченных и выпускаемых серийно приборостроительной промышленностью функциональных узлов, объединенных общим алгоритмом функционирования и совместимыми соединителями *интерфейса*. Под интерфейсом понимаются электрические, логические и конструктивные условия, которые определяют требования к соединяемым функциональным узлам и связям между ними.

Агрегатный принцип построения ИИС обладает рядом достоинств: резко сокращается срок разработки системы и ввод ее в действие; система просто перестраивается в процессе эксплуатации, если требования к ней изменяются; отдельные функцио-

нальные узлы можно легко заменить на более совершенные образцы и т. д.

Различают пять видов совместимости изделий агрегатных комплексов: энергетическую, метрологическую, конструктивную, эксплуатационную и информационную.

Энергетическая совместимость предполагает выбор одного рода энергии носителя сигналов в измерительных устройствах. Для этой цели в ГСП предусмотрено три вида энергии: электрическая (наиболее распространенная), пневматическая и гидравлическая. Последние обычно применяются в особых условиях эксплуатации ИИС, например во взрывоопасных помещениях и т. д.

Метрологическая совместимость обеспечивает сопоставимость метрологических характеристик агрегатных средств, их сохранность во времени и под действием влияющих величин, а также возможность расчетного определения метрологических характеристик всего измерительного тракта ИИС по метрологическим характеристикам отдельных функциональных узлов, образующих измерительный тракт. При этом метрологические характеристики агрегатных средств нормируются по единому методу, а параметры входных и выходных цепей согласуются, чтобы сопряжение агрегатных средств не сопровождалось заметными дополнительными погрешностями.

Эксплуатационная совместимость достигается согласованностью характеристик, определяющих действие внешних факторов на агрегатные средства в рабочих условиях, а также характеристик надежности и стабильности функционирования. Для этого все средства делятся на группы по использованию в зависимости от условий окружающей среды, механических воздействий и т. д. Эксплуатационная совместимость создаст возможность компоновки системы с заданными значениями параметров надежности и рабочими условиями эксплуатации.

Конструктивная совместимость обеспечивает согласованность конструктивных параметров, механическое сопряжение средств, согласованность эстетических требований. Достигается это путем нормирования единых форм элементов конструкций, установочных и присоединительных размеров, применения единой технологии изготовления и сборки конструкций, соблюдения единого стиля оформления.

Информационная совместимость обеспечивает согласованность входных и выходных сигналов по виду, диапазону изменения, порядку обмена сигналами. Информационная совместимость определяется унификацией измерительных сигналов и применением стандартных интерфейсов. Унификация измерительных сигналов означает, что их параметры не могут выбираться произвольно, а должны отвечать требованиям стандарта на эти сигналы. Электрические условия определяют требования к параметрам сигналов взаимодействия и способу их передачи, логические — номенклатуру сигналов, пространственные и временные — соотношения между ними, конструктивные — конструктивные требования к элементам интерфейса: вид разъема, место его расположения, порядок распылки контактов и т. д.

14.2. Основные структуры ИИС

Обобщенная структурная схема ИИС приведена на рис. 14.2. Магистраль представляет канал общего пользования (КОП), с которым соединяются средства измерений (СИ) — приборы-модули, средства вычислительной техники (СВТ) и вспомогательные устройства (ВУ). Конструктивно КОП представляет собой набор кабелей определенной конструкции и протяженности.

Приборы-модули, совместимые с КОП, определяют функциональные возможности и метрологические характеристики ИИС в целом. В настоящее время номенклатура СИ позволяет создавать ИИС практически с любыми измерительными задачами. Кроме того, большинство выпускаемых в настоящее время за рубежом радиоизмерительных приборов обладают интерфейсными функциями КОП и могут быть использованы наравне с отечественными СИ в составе ИИС без каких-либо доработок. Одновременно с расширением номенклатуры СИ с интерфейсными функциями по стандарту КОП происходит улучшение их метрологических, технических и эксплуатационных характеристик. Многие из выпускаемых СИ приспособлены к эксплуатации не только в лабораторных, но и в полевых условиях.

Управление работой всех устройств ИИС осуществляет контроллер. В качестве внешних запоминающих устройств удобны накопители на флэш-памяти или на жестких дисках. Кроме

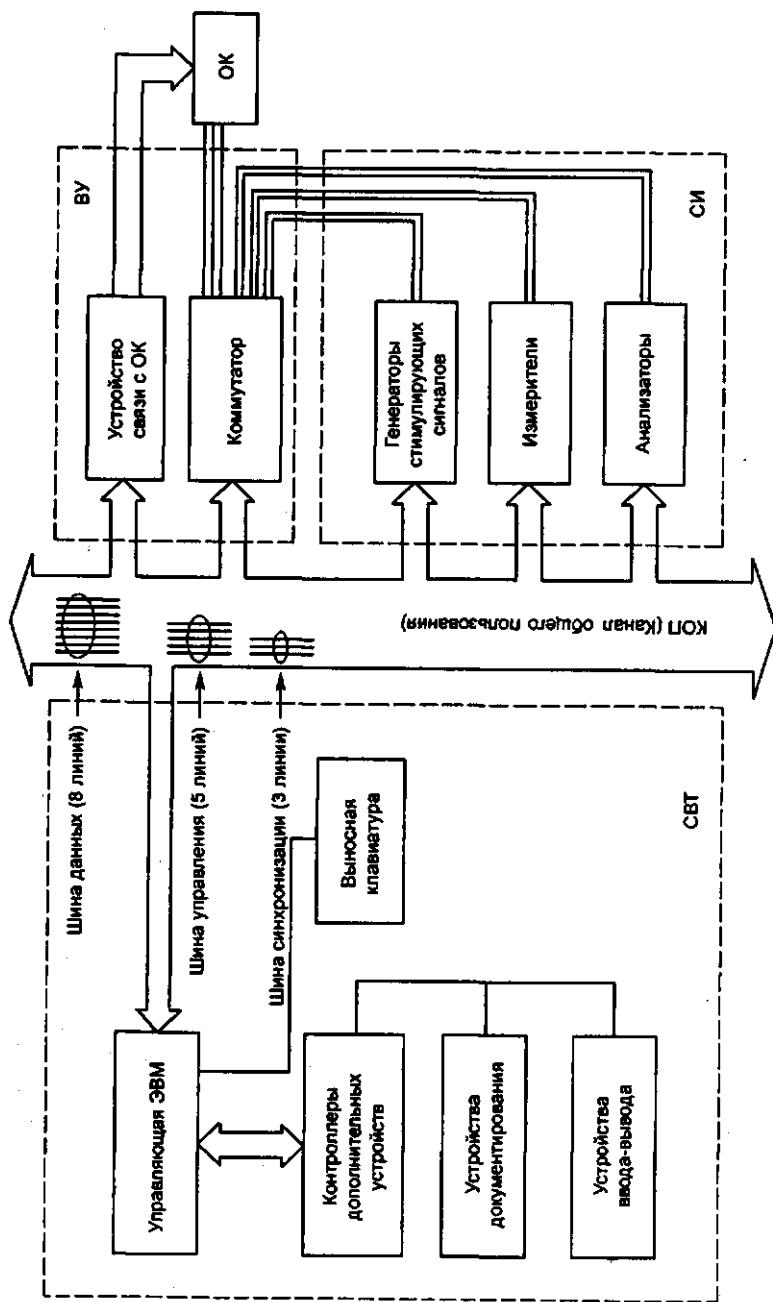


Рис. 14.2. Обобщенная структурная схема ИИС: СВТ — средства вычислительной техники; СИ — средства измерений; ВУ — вспомогательные устройства; ОК — объект контроля

того, ИИС должна оснащаться принтером и дисплеем с клавиатурой.

Для сопряжения ИИС с контролируемым объектом в каждом конкретном случае используется ВУ, важнейшие узлы которого — устройство связи с *объектом контроля* (ОК) и коммутатор. Устройство связи устанавливает режимы работы ОК, переключает диапазоны, осуществляет коммутацию внутри его цепей и т. д.

Коммутатор ИИС служит для концентрации и распределения измерительных ресурсов ИИС. С его помощью контролируемые выходы объектов контроля по программе ЭВМ подключаются к измерительным входам приборов, установленных в блоке средств измерений (СИ). В зависимости от видов и объемов контроля в состав ИИС могут входить несколько однотипных или разнотипных коммутаторов, например высокочастотные и низкочастотные. Для обеспечения большей полноты автоматизированных проверок технического состояния контролируемых устройств важно, чтобы все ВУ были совместимы с КОП и управлялись через него.

Неотъемлемой частью ИИС является ее *программное обеспечение* (ПО), которое также целесообразно строить по модульному принципу. Это обеспечивает ускорение настройки ПО на изменение задач, решаемых ИИС. Программное обеспечение ИИС включает в себя две основные части: *базовое* (системное) *программное обеспечение* (БПО) и *функциональное* (прикладное) *программное обеспечение* (ФПО).

Базовое ПО — наиболее универсальная часть ПО, общая для различных ИИС. Программы, входящие в его состав, обеспечивают управление всеми аппаратными и программными ресурсами, связь оператора с системой, а также автоматизацию разработки программ ФПО. Так как БПО носит универсальный характер, оно может разрабатываться и поставляться вместе с управляющей ЭВМ. При проектировании и сборке конкретной ИИС остается только настроить БПО под эту систему.

Функциональное ПО реализует конкретные алгоритмы измерений и обработки получаемой информации. При его разработке необходимо иметь четкое представление о задачах, решаемых с помощью данной ИИС с учетом их возможного изменения при эксплуатации системы. Следует предусмотреть возможность разработки прикладных программ оператором, не являющимся профессиональным программистом. Желательно реализовать ФПО

с учетом возможностей повторного использования некоторых программ в последующих разработках. Со временем может быть создана библиотека прикладных программ, реализующих алгоритмы контроля для технических объектов различных классов.

Состав приборов-модулей ИИС определяется прежде всего измерительными задачами, т. е. свойствами объекта контроля. Чем больше число контролируемых параметров, тем большее количество СИ включается в ИИС. Некоторые технические средства ИИС при смене объекта контроля могут оставаться неизменными по функциональному назначению, в других случаях изменяется число кабелей КОП (длина КОП), коммутаторов, устройств внешней памяти. Кроме того, для различных по сложности и функциональному назначению объектов контроля обычно используются однотипные СИ, например мультиметры, электронно-счетные частотомеры, генераторы сигналов. Поэтому один и тот же состав аппаратуры, включаемой в комплектацию ИИС, предназначенной для контроля технического состояния различных объектов контроля, называют базовой частью (ядром) ИИС. Адаптация базовой ИИС к новым видам контролируемых объектов заключается в уточнении состава приборов-модулей и ФПО. Системы контроля и диагностики широкого профиля могут создаваться на основе базовых ИИС. Разработчику таких систем достаточно только дополнить базовую ИИС необходимыми СИ, разработать соответствующее ФПО, коммутирующие и присоединительные устройства.

Магистральная структура легко позволяет наращивать число функциональных узлов в системе. Эта структура применяется для решения задач автоматизации различных экспериментальных исследований.

В состав ИИС первичные ИП и исполнительные устройства не входят, выбор их типов и размещение на объекте производится специалистами-разработчиками объекта исследования. Современные сложные ИИС часто рассматривают как композицию трех комплексов — информационного (включающего средства измерения и преобразования информации и средства отображения информации), вычислительного (включающего средства обработки и хранения информации и устройства управления) и управляющего (включающего устройство формирования управляющего воздействия).

Управление информационно-вычислительными комплексами от ЭВМ осуществляют специальные программы-драйверы.

Наиболее перспективными для ИИС и ИВК в настоящее время являются модульная система технических средств для обработки данных КАМАК (ГОСТ 27080—93) и приборный интерфейс, рекомендованный Международной электротехнической комиссией (МЭК) в качестве международного стандарта.

14.3. Комплекс КАМАК (САМАС)

Комплекс КАМАК разработан международным комитетом ESONE Евратома, объединяющим несколько десятков лабораторий ряда стран Европы, специализирующихся на создании приборов и систем для научных экспериментов в области ядерной энергетики.

В больших исследовательских центрах имеется, как правило, большая центральная ЭВМ, с ней связаны несколько малых ЭВМ, которые могут одновременно участвовать в различных экспериментах. Все связи малых ЭВМ с экспериментальным оборудованием выполнены через каркасы КАМАК.

С течением времени система КАМАК распространилась и на другие сферы научных исследований: астрономических, океанографических, медицинских, биохимических и т. д. Хотя система КАМАК разрабатывалась для научных исследований, она оказалась пригодной также и для использования в управлении технологическими процессами на промышленных предприятиях, электростанциях и т. д. В настоящее время уже имеются примеры успешного применения системы КАМАК в области управления промышленностью и электроэнергетикой. Комплекс КАМАК основан на информационной, конструктивной и метрологической совместимости функциональных блоков. Блоки отличаются тем, что каждый из них содержит помимо функциональной части, определяющей его назначение, программно-управляемую логическую схему, которая подключается к общей многопроводной магистрали. Магистраль через блок сопряжения (контроллер) связана с ЭВМ. Структура магистрали универсальна, так что любой блок может быть установлен на любое свободное место в общем карка-

се или заменен другим блоком. При этом может изменяться лишь часть программы управления.

Блоки комплекса КАМАК могут работать и в автоприемном режиме, т. е. без ЭВМ, но для этого устанавливается специальный генератор команд.

Основой механической конструкции в комплексе является каркас шириной 483, высотой 222 и глубиной 525 мм. В каркасе можно поместить 25 блоков (модулей) шириной 17,2 мм каждый. Допускается применение блоков двойной, тройной ширины и т. д. Блок шириной 17,2 мм обозначается 1М, двойкой ширины — 2М, тройной — 3М и т. д. В каждой ячейке блочного каркаса имеется 86-контактный соединительный разъем с плоскими контактами, в который вставляется ответная часть, выполненная печатным монтажом на плате блока. Блок питания располагается в задней части каркаса.

Основными элементами блока являются печатная плата из двустороннего фольгированного материала, лицевая панель, направляющие для установки блока в ячейку и разъем. Размеры печатной платы 200 × 306 мм, размеры лицевой панели 222 × 17,2 мм (при ширине 1М). Контакты печатной платы, предназначенные для установки в разъем (по 43 с каждой стороны), выполняются печатным монтажом и покрываются золотом для получения надежного соединения. Через эти контакты блок соединяется с проводами общей магистрали каркаса. Связи блока с источниками и получателями информации (датчиками, выходными приборами, испытательными устройствами и т. д.) выполняются через другие разъемы, которые крепятся на его лицевой панели.

Блок-контроллер имеет ширину 2М. Он занимает два крайних гнезда в правой части каркаса. Таким образом, для обычных функциональных блоков остаются 23 посадочных места.

Структура связей внутри каркаса между контроллером и 23 функциональными блоками показана на рис. 14.3.

Каркас рассматривается со стороны монтажа, поэтому контроллер изображен слева, а от него начинается нумерация функциональных блоков. Связи изображены горизонтальными линиями. Стрелки указывают направления сигналов: либо от контроллера к блокам, либо от блоков к контроллеру. Помимо однопроводных линий, каждая из которых передает определенный сигнал, имеются четыре группы многопроводных связей

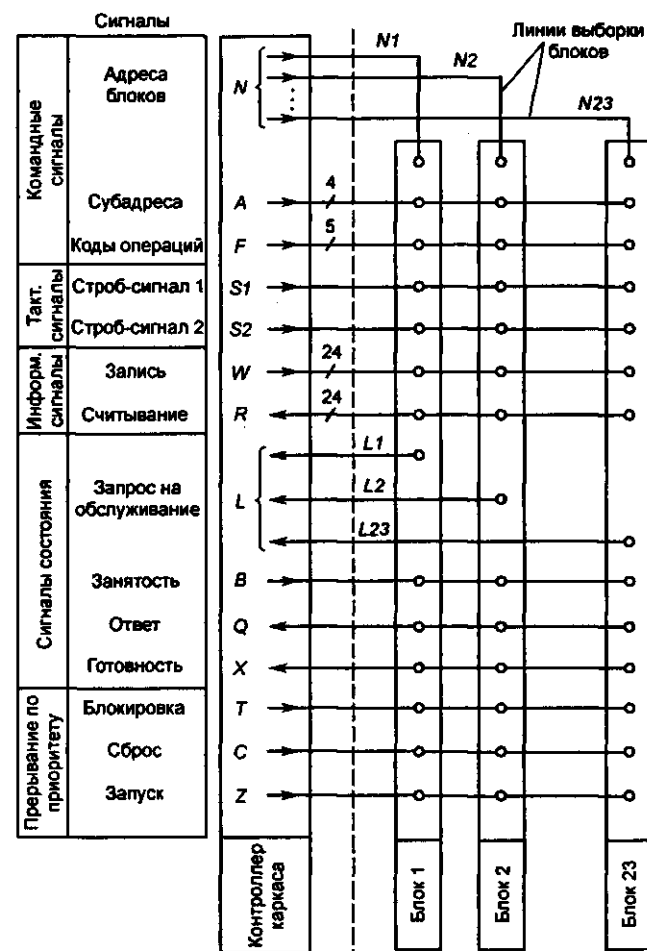


Рис. 14.3. Структура связей между контроллером и функциональными блоками внутри каркаса

с обозначениями *A* (адреса), *F* (коды операций), *W* (запись), *R* (считывание). Каждая такая группа предназначена для передачи кодированных сообщений в виде параллельных кодов. На рис. 14.3 каждая такая группа проводов изображена одной линией, перечеркнутой кривой с цифрой, указывающей число проводов в группе. Большая часть линий связи имеет магистральную структуру. Это значит, что каждая линия соединяет одноименные контакты всех 23 разъемов каркаса. Но есть две

группы связей: N (адреса блоков) и L (запрос на обслуживание), которые не являются магистральными, а выполнены отдельным проводом для каждого блока.

На рис. 14.3 не показаны линии, связывающие источник питания каркаса со всеми функциональными блоками. Для подвода питания в каждом разъеме используются 14 контактов. Один из них соединен с общей нулевой шиной, на другие подаются потенциалы: +6 В, +12 В, +24 В, -6 В, -12 В, -24 В. Несколько контактов оставлены в резерве для подачи других напряжений (в том числе переменных).

Различают следующие группы сигналов: командные, тактирующие, информационные, сигналы состояния, сигналы прерывания по приоритету.

В число командных сигналов входят:

- 23 индивидуальных адресных сигнала N , с помощью которых контроллер указывает, к каким блокам он обращается;
- субадрес A в виде 4-разрядного параллельного кода, указывающего, к какому из 16 возможных элементов источников информации в блоке обращается контроллер;
- 5-разрядный код операции F , указывающий избранному элементу блока одну из 32 возможных функций, которую он должен выполнять.

В число информационных сигналов входят:

- сигнал записи W — 24-разрядный параллельный код, поступающий от контроллера к избранным блокам;
- сигнал считывания R — 24-разрядный параллельный код, поступающий от избранных блоков к контроллеру.

Тактирующие (стробирующие) сигналы $S1$, $S2$ определяют моменты, в которые должны восприниматься получателями сигналы, подаваемые по другим проводам (в частности, информационные сигналы W , R).

В число сигналов состояния входят:

- 23 индивидуальных сигнала L , по которым каждый из блоков может выдать по своей инициативе запрос на обслуживание; такая потребность может возникнуть, например, когда внезапно изменяется состояние какого-либо объекта, с которым связан данный блок;
- сигнал занятости B , означающий, что во время его наличия происходит процесс выполнения команд;

- сигнал ответа Q , которым блок указывает, что расшифровал команду, переданную ему контроллером;
- сигнал готовности X , указывающий на то, что блок в состоянии исполнить принятую им команду.

Группа сигналов прерывания по приоритету подается на все блоки одновременно, без сигналов адресации. Сигнал блокировки I может заблокировать (запретить) работу блока или его части; сигнал сброса C устанавливает в начальное состояние некоторые части системы; сигнал запуска Z устанавливает в исходное состояние все блоки.

Если число используемых блоков в системе превышает число мест в одном каркасе, то применяется многокаркасная система. Она рассчитана на объединение до семи каркасов. В ней наряду со связями внутри каркасов имеются связи между каркасами. Группа каркасов образует ветвь. Для ее функционирования используется дополнительно отдельный блок управления ветвью. Кроме того, контроллер каждого каркаса должен обеспечивать связь магистрали каркаса с магистралью ветви и блоком управления. Поэтому в такой системе используются контроллеры другой разновидности, называемые контроллерами типа А. Структурная схема многокаркасной системы приведена на рис. 14.4.

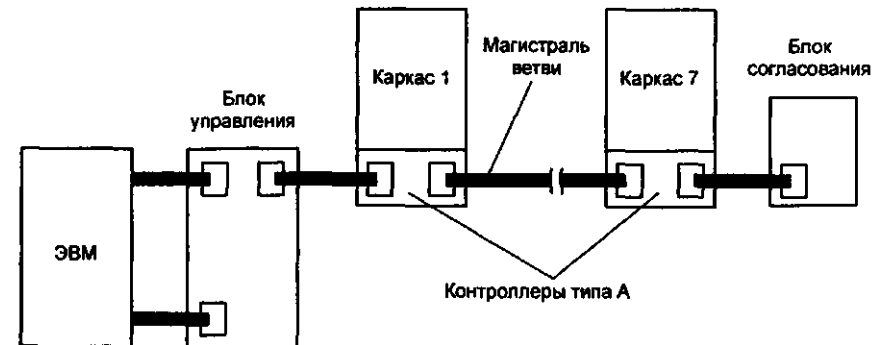


Рис. 14.4. Структурная схема многокаркасной системы

Магистраль ветви (ветвь) выполнена в виде кабеля, имеющего 66 свитых пар проводов, которые начинаются в блоке управления ветвью, проходят через контроллеры и заканчиваются в блоке согласования, содержащем согласующие резисторы для

обеспечения оптимальных условий распространения сигналов по линии.

Блок управления ветвью получает команды от ЭВМ и выполняет две функции: с одной стороны, он управляет ветвью, а с другой — служит для сопряжения ветви с ЭВМ.

Структура связей между каркасами по магистрали ветви показана на рис. 14.5. Здесь применена та же символика, что и на рис. 14.3. Каждая линия, изображающая многопроводную связь, также перечеркнута кривой с цифрой, указывающей число проводов. Обозначения всех сигналов магистрали ветви содержат впереди букву *B* (от английского слова *Branch* — ветвь). Ряд сигналов совпадает по назначению с сигналами внутрикаркас-

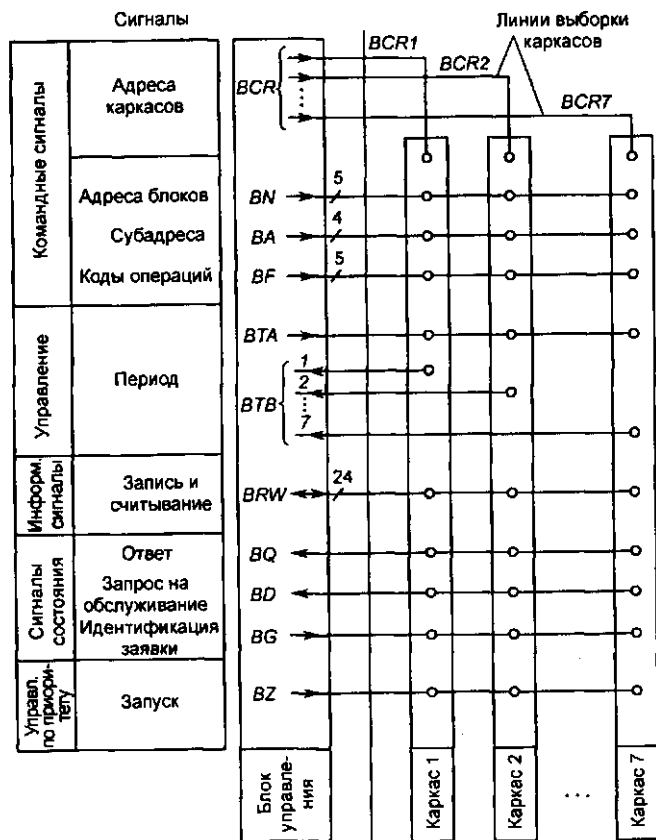


Рис. 14.5

ной магистрали. Их обозначения сохранены, но к ним впереди добавлена буква *B*. Ниже поясняется назначение каждой группы сигналов.

Командные сигналы:

- адреса каркасов *BCR* — сигналы выбора каркасов, подаваемые от блока управления на каркасы по индивидуальным проводам;
- адрес блока *BN* — пятиразрядный параллельный код, которым блок управления указывает номер блока внутри избранного каркаса (внутри каркаса номера блоков задаются индивидуальными проводами);
- субадрес *BA* — четырехразрядный код номера элемента внутри избранного блока (совпадает по назначению и форме с сигналом *A* внутри каркаса);
- код операции *BF* — пятиразрядный код номера заданной функции (операции), совпадающий по назначению и форме с сигналом *F* внутри каркаса.

Сигналы управления:

- *BTA* — которым блок управления указывает, что на магистрали ветви выполняется команда;
- *BTB* — индивидуальные сигналы, которыми контроллеры подтверждают выполнение заданной операции. На основе сигналов *BTA*, *BTB* контроллеры формируют сигналы *S1*, *S2*.

Информационные сигналы записи и считывания *BRW* совпадают по назначению с сигналами *R* и *W* в каркасной магистрали, но в отличие от них передаются по одним и тем же проводам (с разделением во времени). Это сделано для экономии числа проводов в магистрали ветви.

Сигналы состояния:

- ответ *BQ* — совпадает по назначению с сигналами *Q* и *X* в совокупности в каркасной магистрали;
- запрос на обслуживание *BD* — совпадает по назначению с сигналами *L* в каркасной магистрали, но отличается тем, что подается по общему проводу; в связи с этим блок управления, получив такой сигнал, должен дополнительными командами выяснить, какие каркасы и какие блоки внутри этих каркасов выдали сигналы запроса на обслуживание;
- идентификация заявки *BG* — этим сигналом блок управления реализует программу поиска источников сигнала *BD*, т. е. идентификации источника заявки.

Сигнал управления по приоритету (сигнал запуска) *BZ* совпадает по назначению с сигналом *Z* в каркасной магистрали.

В системе КАМАК стандартизованы не только структура связей и сигналы обмена информацией, но и логические и временные соотношения между всеми сигналами, а также их электрические параметры: полярности, уровни, нагрузочная способность.

Схемы разнообразных функциональных блоков в системе КАМАК строятся на основе интегральных микросхем. Что касается контроллеров и блоков управления ветвью, то до недавнего времени их также строили на основе микросхем. Но уже имеются примеры использования универсальных микропроцессоров и микрокомпьютеров в качестве контроллеров и блоков управления.

Ниже перечисляются наиболее широко распространенные программно-управляемые функциональные блоки системы КАМАК.

1. *Блок двоичных счетчиков.* В нем содержатся четыре независимых 16-разрядных счетчика с частотой счета до 25 МГц. Счетчики можно объединять при необходимости увеличения их емкости.

2. *Блок набора констант.* Предназначен для ручного набора данных, которые затем могут быть считаны контроллером и введены в ЭВМ. Могут быть набраны три 16-разрядных числа в двоичном или двоично-десятичном коде. При этом оператор задает числа в десятичном коде, а в блоке выполняются необходимые преобразования.

3. *Аналого-цифровой преобразователь.* Существует много разновидностей таких блоков, различающихся по диапазону и полярности входных напряжений, точности и быстродействию преобразования. Широко применяется преобразователь, измеряющий амплитуду коротких импульсов длительностью порядка 100 нс. Диапазон измеряемых амплитуд — 0,02...6 В, класс точности 0,5; задержка преобразования 1 мкс.

4. *Цифро-аналоговый преобразователь.* Блок преобразует параллельный двоичный код в постоянное напряжение, которое может быть подано на вход осциллографа для визуального контроля, на источник питания с автоматической регулировкой и т. д.

5. *Коммутатор аналоговых сигналов.* В сочетании с аналого-цифровым преобразователем такой блок позволяет образовать многоканальную измерительную систему.

6. *Блок интерфейса к цифровому вольтметру.* Он позволяет снимать данные с выхода цифрового вольтметра и вводить их с помощью контроллера в ЭВМ.

7. *Десятичный индикатор.* Предназначен для визуального воспроизведения информации, выдаваемой ЭВМ, на цифровых индикаторах.

8. *Преобразователь двоичного кода в двоично-десятичный.* Применяется для вывода информации из ЭВМ на цифровые индикаторы, принтеры.

9. *Блок интерфейса к печатающему устройству.* Обеспечивает сопряжение принтера с магистралью каркаса. Данные из ЭВМ для печати выводит на эту магистраль контроллер каркаса.

10. *Генератор тактовых импульсов.* Содержит генератор с кварцевой стабилизацией и набор делителей частоты и формирователей импульсов. Сигналы от этого блока используются в контроллере и других функциональных блоках (например, аналого-цифрового преобразователя).

11. *Индикатор магистрали.* Содержит набор световых индикаторов, указывающих наличие логических сигналов на шинах магистрали каркаса по окончании заданной операции, чем позволяет оперативно контролировать правильность обмена сигналами.

14.4. Приборный интерфейс МЭК 625.1

Интерфейс МЭК 625.1 (ГОСТ 26.003—80) предоставляет пользователю практически одинаковые возможности с КАМАКом, но облегчает создание ИИС, поскольку исключается необходимость применения специальных конструкций крейтов и вставных функциональных блоков. При этом область применения ИИС определяется только возможностями серийно изготавливаемых приборов-модулей, приспособленных, как правило, к работе не только в лабораторных, но и в достаточно жестких условиях (при повышенных и пониженных температурах, транспортировке и т. д.).

Международный стандарт МЭК 625.1 предоставляет возможность создавать различные АИС по приборно-модульному принципу. Основой для агрегатирования программно-управляемых приборов-модулей, каждый из которых может функционировать и автономно, и в составе АИС, в стандарте МЭК 625.1, как и в системе КАМАК, является наличие стандартного интерфейса, представляющего собой совокупность электрических, механических и программных средств для соединения между собой объекта измерений с необходимыми приборами-модулями, измерительными преобразователями, ЭВМ (мини-ЭВМ). Иногда под интерфейсом понимают только канал (шину) общего пользования, но это ошибочное представление. Сама шина не позволит управлять элементами ИИС, если в каждом из приборов-модулей не будет иметься встроенный интерфейсный модуль (например, микропроцессор) или каждому прибору-модулю не будет придано адаптирующее устройство, с помощью которого прибор-модуль может быть подсоединен к стандартной шине. Сочетание канала общего пользования (КОП), встроенных в приборы-модули интерфейсных функций, набора определенных программ управления приборами-модулями (а в необходимых случаях и объектом измерений) и порядка обмена информацией образует интерфейс. Отсюда следует, что необходимо стремиться к единому стандартному интерфейсу, разрабатывая приборы-модули с учетом конструктивов этого интерфейса. В противном случае при агрегатировании приборов-модулей в ИИС окажется необходимым создавать адаптерные устройства, что существенно усложняет и удорожает ИИС, лишает их преимуществ, обеспечиваемых применением серийных приборов-модулей.

В настоящее время в нашей стране стали производиться автоматизированные измерительные приборы, имеющие встроенные интерфейсные модули в соответствии с ГОСТ 26.003—80. Автоматизированная измерительная система в этом случае может быть представлена в виде, показанном на рис. 14.6, а: к КОП подсоединяются объект измерений, набор измерительных приборов-модулей, мини-ЭВМ или контроллер и другие вспомогательные устройства (например, принтер). При разработке программы работы ИИС определяются и задаются порядок коммутации измерительных цепей в объекте измерений и приборах-модулях, маршруты сигналов управления, синхронизации и измеренных данных и др. Команды управления, синхронизации и данных пе-

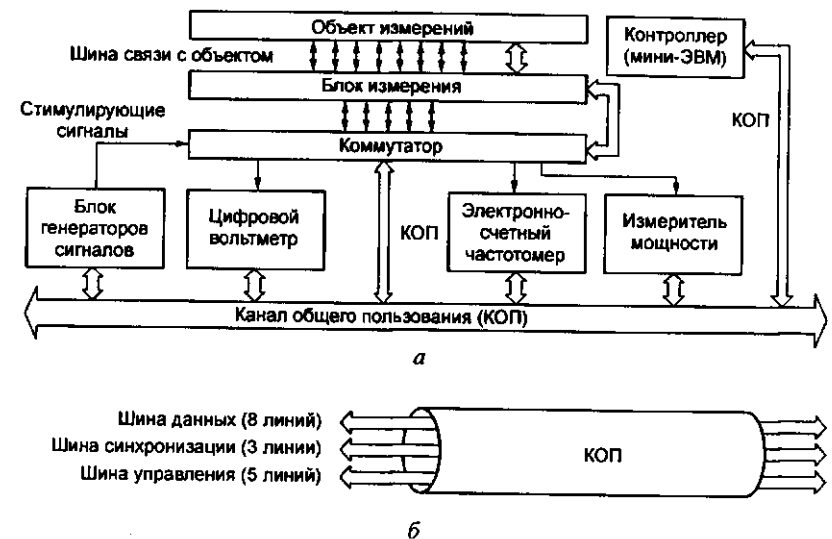


Рис. 14.6. Приборный интерфейс МЭК 625.1: а — структурная схема агрегатирования средств измерений; б — состав канала общего пользования

редаются по специально выделенным линиям КОП (рис. 14.6, б). С помощью контроллера или мини-ЭВМ источники запрашиваемой информации, очередность обслуживания, адресаты передачи и приема сообщений устанавливаются таким образом, чтобы все приборы-модули и объект измерений действовали как единая система. Особенно большие возможности создания ИИС открываются при использовании автоматизированных приборов-модулей со встроенными микропроцессорами. В большинстве случаев в одном микропроцессоре одновременно удается совместить функции программного управления прибором и интерфейсные функции. Магистраль интерфейса (КОП) состоит из 16 линий: по 8 из них производится асинхронная передача и прием информации; 3 линии служат для передачи сигналов синхронизации (сигналы готовности, сигналы-квитанции сопровождения измерительной информации); 5 линий предназначены для передачи сигналов управления интерфейсом (начало передачи, конец передачи, запрос на обслуживание и т. д.).

Магистраль интерфейса представляет собой гибкий кабель, на каждом конце которого имеется один двусторонний разъем с винтовыми зажимами, что обеспечивает установку одного разъ-

ема на другой. Максимальная длина магистрали 20 м. К ней может быть подсоединено 15 различных приборов и управляющих устройств. Если требуется удлинить магистраль или увеличить число приборов (сверх 15), то с помощью так называемого терминального блока магистраль может быть удлинена еще до 20 м. При этом передача сигналов осуществляется последовательно (по битам). В настоящее время получена возможность значительного увеличения длины магистрали интерфейса за счет использования волоконно-оптических линий связи. При этом по линии связи обмен информацией производится последовательными кодами.

Контрольные вопросы

1. Чем вызвана необходимость создания измерительно-информационных систем?
2. Каким образом информация, собранная системой, доводится до оператора?
3. Какими путями достигается упрощение проектирования ИИС?
4. Какие виды совместимости необходимы при разработке компонентов ИИС?

Литература

1. Болтон У. Карманный справочник инженера-метролога / У. Болтон; пер. с англ. — М. : Додэка-XXI, 2002.
2. Димов Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация / Ю. В. Димов. — СПб. : Питер, 2005.
3. Измерения в электронике: справочник / В. А. Кузнецов и др. / под ред. В. А. Кузнецова. — М. : Энергоатомиздат, 1987.
4. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н. Н. Евтихийев и др. / под общ. ред. Н. Н. Евтихиева. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
5. Классен К. Б. Основы измерений. Электронные методы и приборы в измерительной технике / К. Б. Классен. — М. : Постмаркет, 2000.
6. Менада Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений / Ф. Менада; пер. с англ. — М. : Мир, 1990.
7. Сергеев А. Г. Метрология / А. Г. Сергеев. — М. : Логос, 2005.
8. Тартаковский Д. Ф., Ястребов А. С. Метрология, стандартизация и технические средства измерений / Д. Ф. Тартаковский, А. С. Ястребов. — М. : Высшая школа, 2002.
9. Харт Х. Введение в измерительную технику / Х. Харт; пер. с нем. — М. : Мир, 1999.
10. Электрорадиоизмерения / В. И. Нефедов и др.; ред. А. С. Сигов. — М. : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2004.

Оглавление

Введение	3
Глава 1. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О МЕТРОЛОГИИ. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТИ	7
1.1. Определение и классификация измерений, методов и средств измерений. Единицы физических величин	7
1.2. Погрешности измерений	16
1.3. Систематические погрешности	23
1.4. Случайные погрешности	25
1.5. Правила и формы представления результатов измерений	31
1.6. Характеристики электроизмерительных приборов	33
Глава 2. ЕДИНСТВО ИЗМЕРЕНИЙ. МЕРЫ ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН	36
2.1. Обеспечение единства измерений	36
2.2. Проверка средств измерений	41
2.3. Калибровка средств измерений	42
2.4. Методы поверки (калибровки) и поверочные схемы	45
2.5. Сертификация средств измерений	48
2.6. Классификация мер	49
2.7. Меры единиц электрических величин	50
2.8. Эталоны единиц электрических величин	57
Глава 3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АНАЛОГОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРАХ	62
3.1. Общие вопросы	62
3.2. Технические требования	63

3.3. Отсчетные устройства	65
3.4. Опорные устройства и устройства для создания противодействующего момента	67
3.5. Устройства для создания успокаивающего момента	69
Глава 4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ..	72
4.1. Шунты и добавочные резисторы	72
4.2. Измерительные трансформаторы. Гальваническая развязка	77
4.3. Измерительные трансформаторы тока	80
4.4. Измерительные трансформаторы напряжения	82
4.5. Датчики Холла	83
Глава 5. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ПРИБОРОВ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ	85
5.1. Общие сведения	85
5.2. Магнитоэлектрические механизмы	86
5.3. Амперметры и вольтметры магнитоэлектрической системы	91
5.4. Электродинамические и ферродинамические механизмы	93
5.5. Амперметры и вольтметры электродинамической и ферродинамической систем	97
5.6. Ваттметры электродинамической и ферродинамической систем	99
5.7. Механизмы электромагнитной системы	103
5.8. Электростатические механизмы и их применение	109
Глава 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ ...	113
6.1. Общие сведения	113
6.2. Основные уравнения и свойства измерительных преобразователей	114
6.3. Измерительная цепь как преобразователь	125
6.4. Методы коррекции погрешностей	128
6.5. Мостовые цепи	131
6.6. Компенсационные цепи	136

Глава 7. ЭЛЕКТРОННЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ	141
7.1. Электронные аналоговые вольтметры	141
7.2. Электронно-лучевые осциллографы	149
7.3. Цифровые осциллографы	157
Глава 8. ЦИФРОВЫЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И АНАЛОГО-ЦИФРОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	162
8.1. Основные понятия	162
8.2. Аналого-цифровые преобразователи и цифровые вольтметры	164
Глава 9. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ	172
9.1. Методы измерения постоянных токов и напряжений	172
9.2. Методы измерения переменных токов и напряжений промышленной частоты	177
Глава 10. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ И КОМПОНЕНТОВ	187
10.1. Общие сведения	187
10.2. Основные методы и средства измерения сопротивления электрической цепи постоянному току	187
10.3. Использование мультиметров в режиме омметра для оценки работоспособности электро-радиотехнических компонентов	199
10.4. Измерение емкости и индуктивности	206
Глава 11. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ	208
11.1. Общие сведения	208
11.2. Измерение мощности в цепях постоянного тока	208
11.3. Измерение активной мощности в цепях переменного тока	210

Глава 12. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ	219
12.1. Одноэлементный индукционный счетчик	219
12.2. Двух- и трехэлементные индукционные счетчики	226
12.3. Схемы включения счетчиков	227
12.4. Электронные счетчики	228
Глава 13. ИЗМЕРЕНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА, ЧАСТОТЫ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ	239
13.1. Измерение фазового сдвига	239
13.2. Измерение частоты	247
13.3. Электромагнитная совместимость. Измерение показателей качества электрической энергии	252
Глава 14. ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ	263
14.1. Общие сведения	263
14.2. Основные структуры ИИС	267
14.3. Комплекс КАМАК (САМАС)	271
14.4. Приборный интерфейс МЭК 625.1	279
Литература	283

Хромови Петр Константинович

Электротехнические измерения

Учебное пособие

Редактор *М. В. Гальперин*
Корректор *В. Г. Овсянникова*
Компьютерная верстка *И. В. Кондратьевой*
Оформление серии *П. Родькина*

Сдано в набор 09.04.2008. Подписано в печать 04.06.2008. Формат 60 × 90^{1/16}.
Печать офсетная. Гарнитура «Таймс». Усл. печ. л. 18,0. Уч.-изд. л. 18,6.
Бумага офсетная. Тираж 2000 экз. Заказ № 9438.

Издательство «ФОРУМ»
101000, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-32-07, 625-52-43
E-mail: mail@forum-books.ru

ЛР № 070824 от 21.01.93
Издательский Дом «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в
Тел.: (495) 380-05-40
Факс: (495) 363-92-12
E-mail: books@infra-m.ru
Http://www.infra-m.ru

По вопросам приобретения книг обращайтесь:

Отдел продаж издательства «ФОРУМ»
101000, Москва — Центр, Колпачный пер., д. 9а
Тел./факс: (495) 625-32-07, 625-52-43
E-mail: natali@forum-books.ru

Отдел продаж «ИНФРА-М»
127282, Москва, ул. Полярная, д. 31в
Тел.: (495) 380-05-40 (доб. 252)
Факс: (495) 363-92-12
E-mail: ati@infra-m.ru

Центр комплектования библиотек
119019, Москва, ул. Моховая, д. 16
(Российская государственная библиотека, кор. К)
Тел.: (495) 202-93-15

Магазин «Библиосфера» (розничная продажа)
109147, Москва, ул. Марксистская, д. 9
Тел.: (495) 670-52-18, (495) 670-52-19

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО ордена «Знак Почета»
«Смоленская областная типография им. В. И. Смирнова».
214000, г. Смоленск, проспект им. Ю. Гагарина, 2.