

Министерство образования и науки Российской Федерации

ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Ларионов А.Н., Чернышев В.В., Ларионова Н.Н.

**АНАЛОГОВЫЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ**

Учебное пособие

Специальности: физика (010701), микроэлектроника и полупроводниковые приборы (010803), радиофизика и электроника (010801)

Воронеж 2004

Утверждено научно-методическим советом физического факультета
23.06.2004 г. Протокол № 6

Авторы: Ларионов А.Н.,
Чернышев В.В.,
Ларионова Н.Н.

Учебное пособие подготовлено на кафедре общей физики физического факультета Воронежского государственного университета.

Рекомендуется для студентов специальностей: 010701 (физика), 010803 (микроэлектроника и полупроводниковые приборы) 4 курса дневной формы обучения, специальности 010801 (радиофизика и электроника) 2 курса вечерней формы обучения.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

1.1. Классификация электроизмерительных приборов

Принцип измерения электрических величин был впервые предложен М.В.Ломоносовым, сделавшим вывод о том, что «электричество взвешено быть может». Первый электроизмерительный прибор был сконструирован современником М.В. Ломоносова Г.В. Рихманом. Это был электрометр, принцип действия которого положен в основу устройства большинства современных измерительных приборов.

Измерительным прибором называется средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия. Измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией измеряемой величины, называется аналоговым измерительным прибором. Структурная схема аналогового электромеханического измерительного прибора содержит измерительную цепь, измерительный механизм и отсчетное устройство (рис.1).

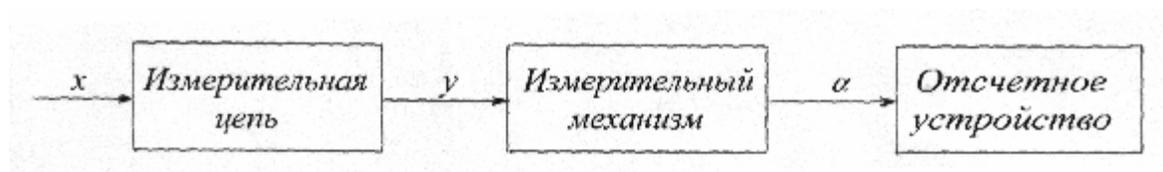


Рис.1

Измерительная цепь прибора служит для преобразования измеряемой величины x в электрическую величину y , непосредственно воздействующую на измерительный механизм. В измерительном механизме электрическая энергия преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части. У большинства измерительных механизмов перемещение подвижной части состоит в повороте относительно неподвижной оси на угол a . Отсчетное устройство состоит из указателя и шкалы и преобразует угловое перемещение подвижной части в перемещение указателя l , которое выражается в делениях или в миллиметрах шкалы. Таким образом, чувствительность аналогового электромеханического измерительного прибора равна:

$$S = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 = (dy/dx) \cdot (da/dy) \cdot (dl/da),$$

где $S_1 = dy/dx$, $S_2 = da/dy$, $S_3 = dl/da$ - чувствительности соответственно измерительной цепи, измерительного механизма и отсчетного устройства.

Электроизмерительные приборы классифицируют в зависимости от рода измеряемой величины, рода измеряемого тока, класса точности и принципа действия. В случае постоянства абсолютной погрешности прибора во всем диапазоне измерений класс точности выбирают из следующего ряда чисел: $1 \cdot 10^n$; $1,5 \cdot 10^n$; $2 \cdot 10^n$; $2,5 \cdot 10^n$; $4 \cdot 10^n$; $5 \cdot 10^n$; $6 \cdot 10^n$; где $n=1; 0; -1; -1; -3; \dots$. Класс точности в этом случае выражается одним числом, соответствующим основной приведенной погрешности во всем диапазоне измерений прибора. Например, приборы класса точности 1,0 имеют допустимую приведенную погрешность 1,0%. Приборы, имеющие приведенные погрешности, превышающие 4,0%, считаются внеклассными. Приборы класса точности 0,05; 0,1; 0,2 и 0,5 используются для выполнения точных измерений как контрольные и лабораторные.

На шкалах приборов наносят условные обозначения, характеризующие измеряемую величину (таблица 1).

Таблица 1.

Род измеряемой величины	Наименование прибора	Условное обозначение
Ток	Амперметр	A
	Миллиамперметр	mA
	Микроамперметр	μ A
Напряжение	Вольтметр	V
	Милливольтметр	mV
	Вольтметр с цифровым отсчетом	$\frac{V}{1000}$
Напряжение и ток	Вольтамперметр	VA
Мощность	Ваттметр	W
Электрическая энергия	Счетчик ампер-часов	Ah
	Счетчик киловатт-часов	kWh
Фазовый сдвиг	Фазометр	φ
Частота	Частотомер	Hz
Электрическое сопротивление	Омметр	Ω
	Мегаомметр	M Ω

На шкалах приборов наносят условные обозначения, отражающие класс точности, принцип действия измерительного механизма, род измеряемого тока и число фаз, защищенность прибора от внешних воздействий, а также требования к условиям эксплуатации (таблица 2, 3).

Таблица 2.

Значение условного обозначения	Условное обозначение
Прибор постоянного и переменного тока	
Прибор переменного тока	
Прибор трехфазного тока	
Рабочее положение шкалы горизонтальное	
Рабочее положение шкалы вертикальное	
Наклонное положение шкалы к горизонту, например, 60°	
Класс точности прибора, например, 1,5	1,5 
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2кВ	
Прибор испытанию прочности изоляции не подлежит	
Осторожно ! Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак красного цвета)	
Защита от внешних магнитных полей 3 мТл	
Защита от внешних электрических полей 10 кВ/м	
Внимание ! Смотрите дополнительные указания	

Таблица 3.

Система измерительного механизма		Условное обозначение	
		с механическим противодействующим моментом	логометр
Магнитоэлектрическая	С подвижной рамкой		
	С подвижным магнитом		
Электромагнитная	Неполяризованная		
	Поляризованная		
Электродинамическая	Электродинамическая		
	Ферродинамическая		
Индукционная			
Тепловая			
Биметаллическая			
Электростатическая			

Общие технические требования ко всем электроизмерительным приборам нормированы ГОСТ 22261-82, согласно которому характеристики электроизмерительных приборов должны удовлетворять следующим условиям:

- 1) погрешность прибора не должна превышать указанного на лицевой стороне предела (класса точности) и не должна изменяться со временем;
- 2) шкала прибора должна быть проградуирована в единицах СИ;
- 3) магнитные и электрические поля, а также температура окружающей среды не должны оказывать влияния на показания прибора;
- 4) прибор должен иметь хорошую успокоительную систему, обеспечивающую быстрое прекращение колебаний подвижной части прибора при изменении измеряемой величины;
- 5) прибор должен потреблять минимальную мощность и выдерживать установленную ГОСТом перегрузку.

Условные обозначения, наносимые на шкалу и корпус электроизмерительных приборов, определены в ГОСТ 23217-78 (табл.1-3).

1.2. Устройство для создания противодействующего момента

Принцип действия большинства аналоговых электромеханических измерительных приборов основан на повороте подвижной части измерительного механизма под действием вращающего момента, который создается в результате преобразования энергии электромагнитного поля (W), сосредоточенной в измерительном механизме, в механическую энергию углового перемещения подвижной части отсчетного устройства и равен скорости изменения этой энергии при повороте подвижной части на угол a :

$$M_g = dW/da . \quad (1)$$

Если бы на подвижную часть измерительного механизма воздействовал только вращающий момент, то она повернулась бы до упора при любом значении измеряемой величины x . Поэтому в каждом электроизмерительном механизме создается противодействующий момент (M_n), пропорциональный углу поворота (a) и направленный противоположно вращающему моменту.

В зависимости от способа создания противодействующего момента все аналоговые электромеханические измерительные приборы можно разделить на две группы:

- 1) приборы с механическим противодействующим моментом, который создается с помощью упругих элементов, закручиваемых при повороте под-

вижной части, причем

$$M_n = \kappa_n \cdot a, \quad (2)$$

где κ_n – модуль упругости пружины или нити;

2) приборы, в которых противодействующий момент создается тем же способом, что и вращающий (логометры).

При равенстве вращающего и противодействующего моментов подвижная часть прибора находится в состоянии равновесия. Приравнявая правые части уравнений (1) и (2), можно найти зависимость угла поворота подвижной части от измеряемой величины и параметров прибора:

$$a = f(x, A_1, A_2, A_3, \dots, A_n), \quad (3)$$

где $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ – параметры прибора. Выражение (3) является основным уравнением, характеризующим свойства прибора, и называется градуировочной характеристикой или уравнением шкалы прибора.

Противодействующий момент в измерительном механизме с установкой подвижной части на опорах (рис.2) создается одной или двумя пружинами 5, 6, выполненными из оловянно-цинковой бронзы. Пружины используются также для подвода тока к рамке подвижной части прибора. Одним концом пружина крепится к оси, а другим – к поводку 4 корректора. Корректор служит для установки на нуль стрелки выключенного прибора и состоит из винта 9 с эксцентрично расположенным пальцем 8, вилки 7 с поводком. При повороте винта 9 корректора перемещается вилка 7, что вызывает закручивание пружины и соответственно перемещение стрелки 3. Ось 2 заканчивается кернами, опирающимися в корпус 1.

В более чувствительных приборах для создания противодействующего момента используются подвесы или растяжки (рис.3). Растяжки представляют собой две тонкие ленты из бронзового сплава, на которых подвешивается подвижная часть измерительного механизма. Применение растяжек или подвесов исключает трение в опорах, облегчает подвижную часть и повышает виброустойчивость. Растяжки используются также для подведения тока к обмотке рамки.

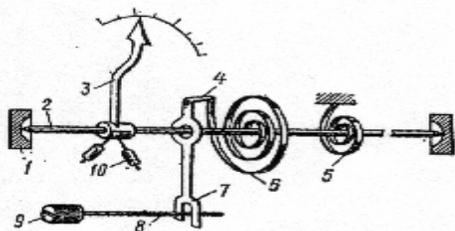


Рис.2.

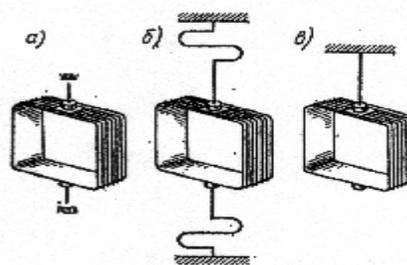


Рис.3.

1.3. Шкалы приборов

Шкалой называется совокупность отметок, изображающих ряд последовательных чисел, соответствующих значениям измеряемой величины. Шкала прибора служит для отсчета значений измеряемой величины. На шкалу наносят также условные обозначения, соответствующие характеристикам данного прибора (табл.1, 2, 3).

Расстояние между двумя соседними отметками называется делением шкалы, а изменение измеряемой величины, вызывающее перемещение стрелки прибора на одно деление, называется ценой деления (c). Цена деления обычно выбирается превышающей погрешность показания прибора (Δx_{np}), то есть $c \geq \Delta x_{np}$. У многих приборов $c = 2 \cdot \Delta x_{np}$ или $c = 4 \cdot \Delta x_{np}$. В многопредельных приборах шкала имеет определенное число делений, по которым путем пересчета определяют измеряемую величину в нужных единицах.

Шкалы могут быть равномерными и неравномерными. Применение равномерной шкалы позволяет производить отсчет с большей точностью. Шкалы градуируют в соответствии с десятичной системой счисления, а цена деления выбирается кратной числам 1, 2 или 5. Поэтому значение цены деления определяется по формуле $c = k \cdot 10^z$, где $k = 1, 2$ или 5 ; z – любое целое число.

Указатели могут быть стрелочными или световыми в зависимости от назначения прибора. Большая часть аналоговых электромеханических измерительных приборов снабжена стрелочными указателями, которые могут быть копьевидными, ножевидными или нитевидными. Стрелочные указатели находятся на некотором расстоянии от шкалы, и для снятия показаний необходимо проецировать положение стрелки на шкалу. При этом положение проекции стрелки зависит от угла между лучом, соединяющим глаз наблюдателя и стрелку с плоскостью шкалы. Этот угол должен быть прямым, что практически трудно реализовать, поэтому измерения стрелочными приборами сопровождаются погрешностью, обусловленной параллаксом (параллакс – видимое смещение предмета вследствие изменения места наблюдателя). Для устранения параллак-



Рис.4.

тической погрешности на шкалах наиболее точных приборов устанавливают зеркальную пластинку (рис.4). Отсчет показаний производят одним глазом, причем глаз располагают так, чтобы стрелка и ее изображение в зеркале сливались воедино. Наиболее точный отсчет по шкале позволяют получать стрелки с ножевидными и нитевидными указателями. Световые указатели выполняют в виде

на шкалу прибора, не имеют погрешности вследствие параллакса и обеспечивают повышение чувствительности измерительного механизма, поскольку угол поворота отраженного луча вдвое превышает угол поворота зеркала, укрепленного на подвижной части прибора.

1.4. Успокоители

Подвижную часть прибора с противодействующей спиральной пружиной следует рассматривать как некоторую колебательную систему. При изменении значения измеряемой величины x подвижная часть прибора будет совершать затухающие колебания по завершении которых можно произвести отсчет. Для увеличения коэффициента затухания колебаний подвижной части прибора используют специальные устройства – успокоители. В зависимости от принципа действия различают три вида успокоителей: воздушные, магнитоиндукционные и жидкостные.

Воздушный успокоитель представляет собой дугообразный цилиндр 1, запаянный с одного конца (рис.5.а). Внутри цилиндра находится поршень 2, который жестко связан с подвижной частью прибора и не касается стенок цилиндра. Зазор между поршнем и цилиндром невелик и при быстрых перемещениях поршня давление внутри цилиндра не успевает выровняться с атмосферным. В цилиндре создаются то сгущения, то разрежения воздуха, которые препятствуют движению поршня и тем самым быстро успокаивают подвижную систему. При медленном движении поршня часть воздуха может свободно входить в цилиндр и выходить из него через зазор, не препятствуя поворотам подвижной части прибора.

Иногда воздушный успокоитель имеет форму замкнутой коробочки со щелью (рис.5.б). Эта щель служит для перемещения рычага 1, на котором укреплена пластинка 2. Последняя не касается стенок коробочки и выполняет

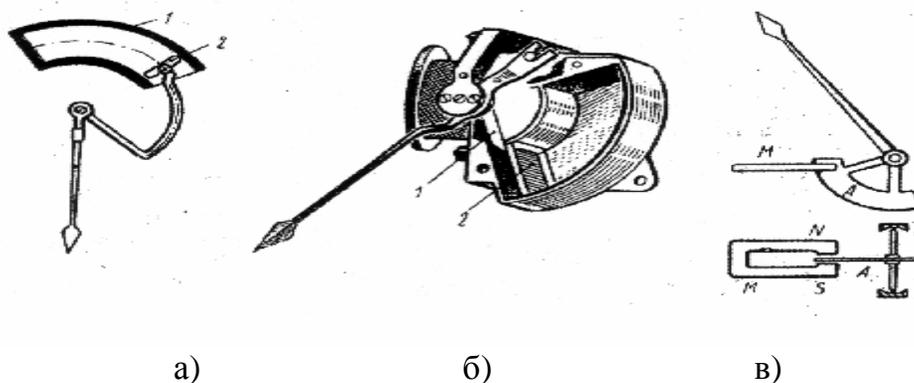


Рис.5.
11

ту же функцию, что и поршень. При движении пластинки в коробочке одновременно возникают и сгущения (по одну сторону пластинки) и разрежения (по другую сторону), препятствующие колебаниям.

Магнитоиндукционный успокоитель представляет собой перемещающуюся между полюсами постоянного магнита M (рис.5.в) легкую алюминиевую пластину A , жестко связанную с подвижной системой прибора. При колебаниях пластины в магнитном поле постоянного магнита в соответствии с правилом Ленца в ней индуцируются токи, препятствующие этим колебаниям, поэтому колебания подвижной системы и стрелки быстро прекращаются.

Жидкостный успокоитель представляет собой крыло, движущееся в жидкости.

Несмотря на конструктивные различия, момент силы, создаваемый рассмотренными устройствами, пропорционален скорости движения подвижной части прибора и характеризуется общей формулой ($M_{\text{уcn}} = P \cdot da/dt$, где P - коэффициент успокоения). Время успокоения подвижной части магнитоэлектрических и электростатических приборов с длиной стрелки более 150 мм не должно превышать 6 с, а остальных приборов - 4 с.

2. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

2.1. Магнитоэлектрический измерительный механизм

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на взаимодействии рамки 3 с током и магнитного поля постоянного магнита M (рис.6). Подковообразный постоянный магнит M , стальные полюсные наконечники N и S , стальной цилиндр образуют магнитную цепь. Полюсные наконечники и стальной цилиндр служат для уменьшения магнитного сопротивления цепи. Благодаря форме полюсных наконечников в большей части воздушного зазора между цилиндром и наконечниками создается радиально направленное однородное магнитное поле, в котором может поворачиваться подвижная рамка 3 . Рамку прибора выполняют из изолированного провода на легком алюминиевом каркасе, укрепленном на двух полуосях. Измеряемый ток проходит в рамку через токоведущие спиральные пружины 5 , слу-

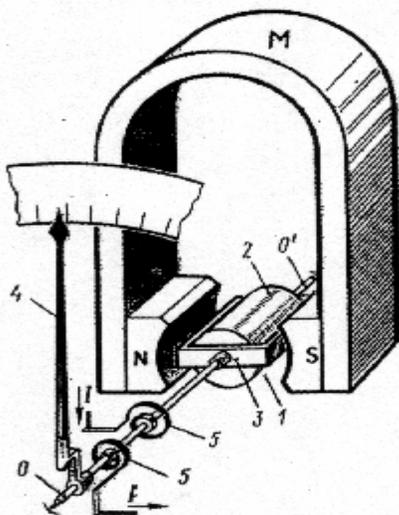


Рис.6.

жидкостью. Благодаря форме полюсных наконечников в большей части воздушного зазора между цилиндром и наконечниками создается радиально направленное однородное магнитное поле, в котором может поворачиваться подвижная рамка 3 . Рамку прибора выполняют из изолированного провода на легком алюминиевом каркасе, укрепленном на двух полуосях. Измеряемый ток проходит в рамку через токоведущие спиральные пружины 5 , слу-

жащие одновременно для создания противодействующего момента. При протекании тока по рамке на ее стороны, находящиеся в воздушном зазоре, действует пара сил (токи в этих сторонах имеют противоположное направление), создающая вращающий момент и поворачивающая рамку вокруг оси. Направление силы F , действующей на одну сторону рамки, может быть определено по правилу левой руки, а значение – с помощью закона Ампера:

$$F = BI\ell w \cdot \sin b,$$

где B – магнитная индукция в зазоре, I – сила тока в рамке, ℓ – длина активной стороны рамки, w – число витков рамки, b – угол между плоскостью рамки и вектором магнитной индукции в воздушном зазоре.

Поскольку магнитное поле в рабочем зазоре радиальное ($\sin b = 0$), то момент этой пары сил, то есть вращающий момент равен:

$$M_{\text{вп}} = 2F \cdot (d/2) = BIw\ell d,$$

где d – ширина рамки, являющаяся плечом пары сил. Так как величины B , ℓ , w , d для данного прибора являются постоянными величинами, то их произведение также является константой, которую обозначим символом k_1 :

$$k_1 = B\ell w d.$$

Тогда вращающий момент можно представить в виде произведения величины, постоянной для данного прибора, и силы тока:

$$M_{\text{вп}} = k_1 \cdot I.$$

Под действием этого вращающего момента рамка поворачивается, закручивая (или раскручивая) спиральные пружины, создающие противодействующий момент:

$$M_{\text{пр}} = k_2 \cdot \alpha,$$

где k_2 – постоянная, характеризующая жесткость пружин, α – угол поворота оси со стрелкой. При протекании по рамке электрического тока силой I подвижная часть измерительного механизма будет поворачиваться до тех пор, пока противодействующий момент, увеличивающийся при повороте рамки, не окажется равен вращающему моменту, то есть:

$$k_1 \cdot I = k_2 \cdot \alpha,$$

следовательно,

$$\alpha = (k_1/k_2) \cdot I = k \cdot I,$$

где $(k_1/k_2) = k$ – постоянная данного прибора по току.

Таким образом, угол поворота стрелки магнитоэлектрического прибора пропорционален току в рамке и шкала такого прибора является равномерной. По принципу работы магнитоэлектрические приборы являются амперметрами и могут быть использованы в качестве гальванометров и амперметров. Ток, протекающий по рамке прибора, создает напряжение $U = IR$, равное напряжению, приложенному к рамке. Подстановка равенства $I = U/R$ в выражение $\alpha = k \cdot I$ позволяет привести его к виду: $\alpha = k \cdot (U/R) = c \cdot U$, где $c = k/R$ – постоянная

прибора по напряжению. Из полученного соотношения следует, что магнитоэлектрический измерительный механизм можно использовать и для изготовления вольтметра. Сопротивление рамки вольтметра должно быть достаточно большим, поскольку данный прибор необходимо включать параллельно нагрузке. Для реализации данного требования рамку вольтметра следует изготавливать из тонкой проволоки, причем число витков должно быть большим (а для амперметра рамку следует изготавливать из небольшого числа витков толстой проволоки). Как в одном, так и в другом случае рамка получилась бы тяжелой, а прибор грубым. Практически рамки амперметров и вольтметров не имеют принципиального различия. В первом случае рамку шунтируют, а во втором последовательно с ней включают добавочное сопротивление. Принцип градуировки магнитоэлектрического прибора в качестве вольтметра основан на прямой пропорциональной зависимости между током в рамке и приложенным к ней напряжением.

Для измерения переменного тока магнитоэлектрические измерительные механизмы без дополнительных устройств – выпрямителей – непригодны, так как направление отклонения стрелки прибора зависит от направления тока в рамке. Следовательно, в цепи переменного тока подвижная часть прибора не будет поворачиваться. Поэтому, если нулевое деление шкалы находится не в ее середине, а на левом ее краю, то около зажимов прибора наносят знаки «+» и «-».

Специальных успокоителей в магнитоэлектрических приборах не делают. Их роль выполняет алюминиевый замкнутый каркас, на котором находится рамка. При колебаниях каркаса в нем индуцируются токи, препятствующие этим колебаниям, и подвижная система прибора быстро успокаивается.

Изменение температуры окружающей среды может влиять на сопротивление рамки прибора, плотность магнитного потока в рабочем зазоре и упругие свойства пружин, создающих противодействующий момент. Однако два последних обстоятельства приблизительно компенсируют друг друга. Например, повышение температуры вызывает уменьшение магнитного потока в рабочем зазоре, то есть вращающий момент уменьшается. При этом уменьшение упругости пружин приводит к уменьшению противодействующего момента. Изменение сопротивления прибора вследствие вариации температуры существенно влияет на показания амперметров, но не сказывается на показаниях вольтметров. Сопротивление рамки вольтметров значительно меньше добавочного сопротивления, которое изготавливают из манганиновой проволоки, имеющей низкий температурный коэффициент сопротивления. Поэтому температура окружающей среды не влияет на сопротивление вольтметра.

Для уменьшения температурной погрешности амперметров применяют специальные схемы температурной компенсации.

К достоинствам магнитоэлектрических приборов относятся: а) равномерная шкала; б) большая точность и высокая чувствительность; в) низкая чувствительность к внешним магнитным полям; г) малое потребление энергии.

Недостатками магнитоэлектрических приборов являются: а) пригодность для измерения только постоянных токов; б) большая чувствительность к перегрузкам; в) сравнительно высокая стоимость.

2.2. Магнитоэлектрические амперметры

Включение амперметра изменяет электрический режим цепи, что приводит к появлению методической погрешности (δ_i) измерения тока. До включения амперметра сила тока в цепи, состоящей из источника с напряжением U и нагрузочного резистора с сопротивлением R (рис.7.а), равна $I=U/R$. Включение амперметра последовательно с нагрузкой приводит к увеличению сопротивления цепи и уменьшению силы тока, поэтому показание амперметра $I_a=U/(R+R_a)$ меньше значения I (R_a – сопротивление амперметра). Относительная методическая погрешность измерения силы тока амперметром равна:

$$\delta_i=(I_a-I)/I=-R_a/(R+R_a)=-1/(1+R/R_a).$$

Из полученного выражения следует, что значением δ_i можно пренебречь, если $R_a \ll R$. Поскольку методическая погрешность δ_i является систематической с известными величиной и знаком, она может быть исключена из результатов измерений с помощью поправки.

Если измеряемый ток I превосходит по значению ток полного отклонения подвижной части I_a , то параллельно цепи измерительного механизма подключается шунт (рис.7.б). Значение сопротивления шунта определяется из условия:

$$I_{ш} \cdot R_{ш} = I_a \cdot R_a, \quad I_{ш} = I - I_a,$$

где $I_{ш}$ – ток, протекающий через шунт. Решение данной системы уравнений позволяет выразить сопротивление шунта через сопротивление амперметра:

$$R_{ш} = R_a / (n - 1),$$

где $n = I / I_a$ – коэффициент, показывающий во сколько раз необходимо расширить предел измерения прибора. Значение сопротивления шунта обычно составляет $10^{-2} \dots 10^{-4}$ Ом. Для исключения влияния на результат измерения сопротивления соединительных проводов и контактов, соизмеримых с сопротивлением шунта, последние выполняют четырехзажимными: два зажима (токовых) используются для включения шунта в цепь измеряемого тока и два зажима (потенциальных) – для подключения к измерительному механизму.

Шунты изготавливают из манганина, обладающего ничтожно малым температурным коэффициентом сопротивления. Большое распространение получили многопредельные ступенчатые шунты (рис.7.в).

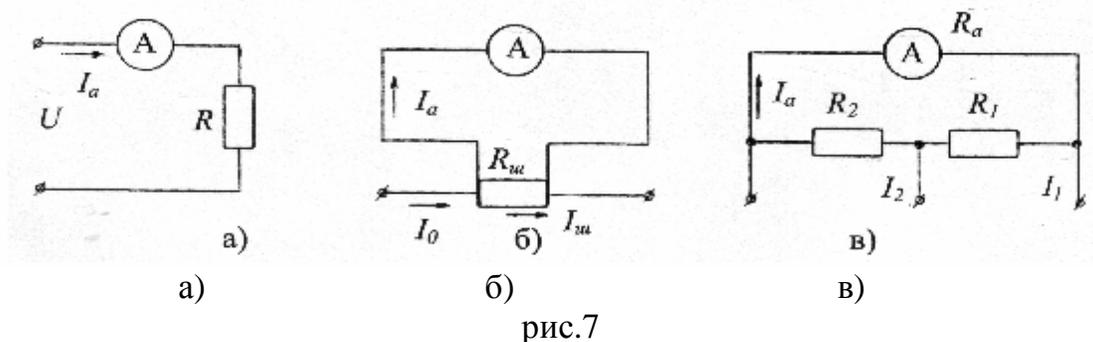


рис.7

В двухпредельном амперметре, если принять $i_1 < I_2$, сопротивления шунтов для пределов I_1 и I_2 соответственно равны:

$$R_{ш1} = R_1 + R_2 = R_a / (n_1 - 1); \quad R_{ш2} = R_2 = (R_1 + R_a) / (n_2 - 1),$$

где $n_1 = I_1 / I_a$; $n_2 = I_2 / I_a$ – коэффициенты шунтирования.

Совместное решение этих уравнений позволяет опередить сопротивления резисторов R_1 и R_2 :

$$R_1 = R_a \cdot (n_1 / n_1 - 1) \cdot (n_1^{-1} - n_2^{-1}); \quad R_2 = R_a \cdot (n_1 / n_2) \cdot (n_1 - 1)^{-1}.$$

Расчет сопротивлений многопредельных приборов выполняется аналогично.

2.3. Магнитоэлектрические вольтметры

Магнитоэлектрический измерительный механизм с включенным последовательно добавочным резистором может быть использован как вольтметр для измерения напряжения. Вольтметр подключается параллельно объекту измерения. В измерительной цепи вольтметра происходит преобразование измеряемого напряжения в ток, необходимый для отклонения подвижной части измерительного механизма.

Предел измерения U_v вольтметра зависит от тока полного отклонения I_v подвижной части и внутреннего сопротивления R_v вольтметра (суммы сопротивлений обмотки рамки R_p , пружин $2R_{пруж}$ и резистора R): $U_v = I_v \cdot R_v$. Ток полного отклонения I_v рамки магнитоэлектрических вольтметров составляет приблизительно 50 мА .

Если значение измеряемого напряжения находится в пределах диапазона измерения вольтметра, то вольтметр может быть включен без добавочного резистора (рис.8.а). Но при этом необходимо учитывать методическую погрешность $\delta_v = 1 / [1 + (R_v / R) + (R_v / R_0)]$. Таким образом, значением δ_v можно пренебречь, если $R \ll R_v$ и $R_0 \ll R$, то есть входное сопротивление вольтметра должно быть значительно больше сопротивления того участка цепи, к которому он подключается.

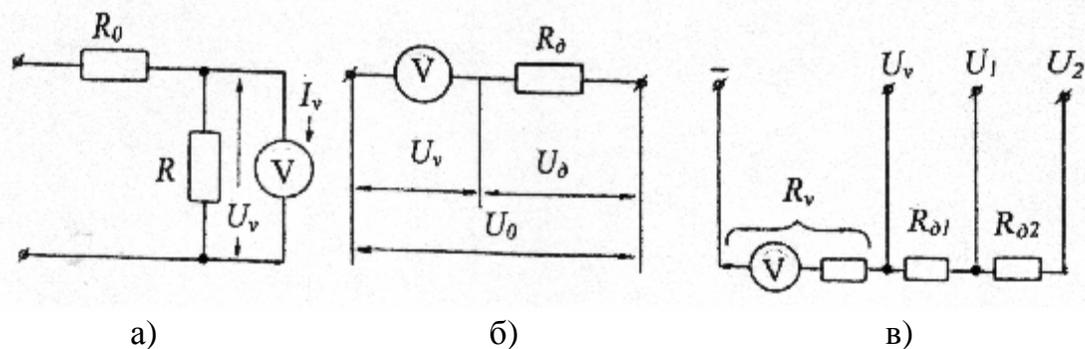


Рис.8

Для расширения пределов измерения магнитоэлектрических вольтметров применяются масштабные измерительные преобразователи – добавочные сопротивления, включаемые параллельно вольтметру (рис.8.б). При известном сопротивлении вольтметра R_v и заданном коэффициенте расширения пределов измерения $m=U/U_v$, сопротивление добавочного резистора определяется с помощью следующей формулы:

$$R_{\delta} = R_v \cdot (m - 1).$$

В многопредельных вольтметрах (рис.8.в) используют ступенчатое включение резисторов и для соответствующих пределов измерения напряжения U_1 и U_2 при заданном токе рамки I_v сопротивления добавочных резисторов рассчитывают по формулам:

$$R_{\delta 1} = R_v \cdot (m_1 - 1); \quad R_{\delta 2} = R_v \cdot (m_2 - 1) - R_{\delta 1},$$

где $m_1 = U_1 / U_v$; $m_2 = U_2 / U_v$ – коэффициенты расширения пределов измерения.

Добавочные резисторы изготавливают из манганинового провода, намотанного на круглые или плоские каркасы из изоляционного материала. Они могут быть как внутренними (до 600 В), так и наружными (до 1500 В). Наружные добавочные резисторы могут быть индивидуальными и взаимозаменяемыми на номинальные токи 0,5; 1; 3; 7,7; 15 и 30 мА.

Магнитоэлектрические вольтметры имеют равномерную шкалу, высокую точность, большую чувствительность, но малое внутреннее сопротивление. Диапазон измеряемых ими напряжений заключен в интервале от микровольт до 1,5 кВ.

2.4. Магнитоэлектрические омметры

Магнитоэлектрический омметр может быть выполнен по последовательной (рис.9.а), или параллельной (рис.9.б) схеме и состоит из магнитоэлектрического измерительного механизма, добавочного резистора и источника питания. Измеряемое сопротивление R_x присоединяется к выходным зажимам.

Шкалу прибора градуируют непосредственно в единицах сопротивления, поскольку угол α перемещения стрелки при постоянстве питающего напряжения U зависит только от измеряемого сопротивления и при последовательной схеме соединения определяется формулой:

$$\alpha = S_i I = S_i U / (R_\partial + R_a + R_x).$$

При $R_x = 0$ перемещение стрелки максимально, а при $R_x = \infty$ ее перемещение равно нулю. Поэтому шкала рассматриваемого омметра имеет нулевую отметку справа (рис.9.в). Омметры с последовательной схемой применяются для измерения сопротивлений более 1 кОм .

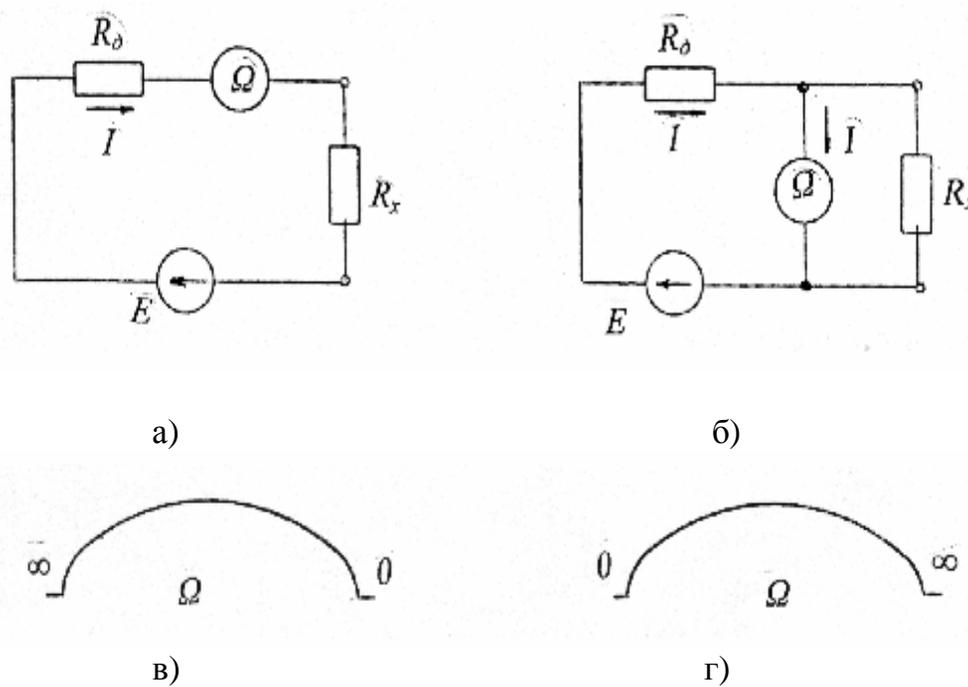


Рис.9

В параллельной схеме (рис.9.б) измеряемое сопротивление подключается параллельно измерителю. Угол α перемещения стрелки зависит от величины измеряемого сопротивления R_x :

$$\alpha = S_i I_a = S_i U / [R_\partial (1 + R_a / R_x) + R_a].$$

При $R_x = 0$ отклонение стрелки равно нулю, а при $R_x = \infty$ отклонение стрелки максимально (рис.9.г). Омметры с параллельной схемой применяются для измерения сопротивлений, не превышающих 1 кОм .

Из полученных выражений для угла α следует, что шкалы омметров неравномерные. Недостатком рассмотренных омметров является также зависимость их показаний от напряжения источника питания. Данный недостаток можно устранить, заменив рассмотренные выше схемы логометром.

2.5. Логометры

Логометры – это электромеханические приборы, измеряющие отношение двух токов I_1 и I_2 :

$$a = f(I_1 / I_2)^n;$$

где n – коэффициент, зависящий от системы измерительного механизма. Особенность логометров заключается в том, что противодействующий момент M_n создается в них тем же способом, что вращающий M , поэтому логометр имеет два воспринимающих элемента, на которые воздействуют измеряемые величины I_1 и I_2 , составляющие измеряемое отношение. Направления величин I_1 и I_2 должны быть такими, чтобы моменты M и M_n , действующие на подвижную часть, были направлены навстречу друг другу. При этом подвижная часть будет поворачиваться под действием большего момента.

В магнитоэлектрических логометрах в неравномерное магнитное поле постоянного магнита помещают подвижную часть измерительного механизма, содержащего две рамки, жестко скрепленные друг с другом под некоторым углом (30° - 90°) и насаженные на общую ось (рис.10). Токи I_1 и I_2 подводят к рамкам с помощью безмоментных токопроводов. Направления токов таково, что ток I_1 создает вращающий, а ток I_2 – противодействующий моменты:

$$M = I_1 \cdot F_1(\alpha); \quad M_n = I_2 \cdot F_2(\alpha).$$

Здесь $F_1(\alpha_1)$ и $F_2(\alpha_2)$ – функции магнитного поля в зазоре и постоянных обо-

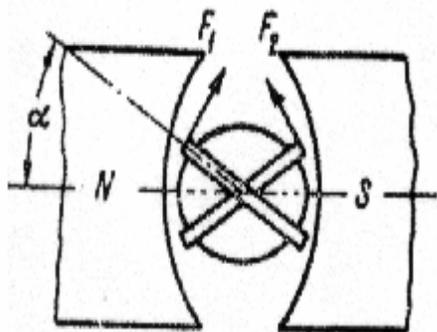


Рис.10

их измерительных механизмов прибора. Положение статического равновесия подвижной части определяется равенством $M = M_n$, что справедливо, если пренебречь другими моментами (например, моментом силы трения в опорах). Из равенства моментов следует, что $I_1 / I_2 = F_2(\alpha) / F_1(\alpha) = F_3(\alpha)$, следовательно, $\alpha = F(I_1 / I_2)$. Данное уравнение показывает, что в отсутствие других моментов, действующих на подвижную часть прибора, отклонение подвижной части определяется исключительно отношением I_1 / I_2 . Обязательным условием получения зависимости $\alpha = F(I_1 / I_2)$ является неодинако-

вость функций $F_1(\alpha)$ и $F_2(\alpha)$, поскольку в противном случае $I_1 / I_2 = const$ и отсутствовала бы зависимость между отклонением подвижной части прибора и отношением токов. Это означает, что катушки прибора должны находиться в различных магнитных полях (и может быть достигнуто, например, использованием сердечника эллиптической формы). Логометры применяются в схемах

приборов, в которых используется вспомогательный источник питания, напряжения которого влияет на показания прибора.

2.6. Гальванометры

Гальванометрами называют электроизмерительные приборы с неградуированной шкалой, имеющие высокую чувствительность к току или напряжению. Высокая чувствительность гальванометров достигается, главным образом, путем уменьшения противодействующего момента и использования светового указателя с большой длиной светового луча.

В межполюсном пространстве постоянного магнита 1 (рис.11.а) с полюсными наконечниками, охватывающими неподвижный сердечник 4 , помещена легкая катушка 3 . В отличие от обычных приборов этой системы катушка 3 крепится на тонкой упругой нити 6 , которая служит для создания противодействующего момента и является одним из проводников, подводящих ток к катушке. Ток к катушке подводят также с помощью тонкой серебряной ленточки 5 . Отсчет угла поворота подвижной части производится с помощью маленького зеркальца 2 , закрепленного на упругой нити 6 . От источника света 1 на зеркальце 2 направляют узкий луч, который, отразившись от зеркальца 2 , падает на шкалу 3 в виде тонкой световой полоски (рис.11.б). При повороте зеркальца 2 на угол α световая полоска перемещается вдоль шкалы на n делений. Значения α и n связаны нелинейным уравнением: $tg2\alpha = n/\ell$. Если угол α невелик (не более 3°), то $tg\alpha \approx \alpha$, следовательно, $\alpha \approx n/2\ell$. При больших углах отклонения следует пользоваться уточненной зависимостью:

$$\alpha = (n/2\ell) - (1/6) \cdot (n/\ell)^3.$$

Поправка $(1/6) \cdot (n/\ell)^3$ возникает вследствие того, что отсчетная шкала 3 прямолинейна, а не изогнута по дуге радиуса ℓ .

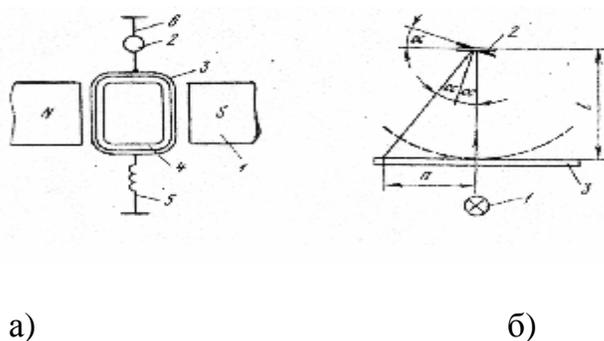


Рис.11.

Уравнение движения рамки гальванометра можно записать в виде:

$$d^2y/d\tau^2 + 2\beta \cdot dy/d\tau + y = I,$$

где $\beta = P / [2 \sqrt{WI}]$ – степень успокоения (W и I – соответственно удельный противодействующий момент и момент инерции рамки); $\tau = \omega_0 t = t \cdot \sqrt{W/I}$; $y = \alpha / \alpha_{cm}$ – относительный угол отклонения рамки; P – коэффициент успокоения.

В зависимости от значения затухания движение рамки может быть колебательным ($\beta < 1$), апериодическим ($\beta > 1$) или критическим ($\beta = 1$). При $\beta = 1$ время установления показаний гальванометра минимально. Критическое значение степени успокоения $\beta = 1$ определяют коэффициентом критического успокоения: $P_k = 2 \sqrt{WI} = P_1 + (B_0^2 \cdot w^2 \cdot s^2) / (R_z + R_{вн})$; где P_1 – часть коэффициента успокоения, определяемая трением в опорах и о воздух; R_z и $R_{вн}$ – сопротивление рамки гальванометра и внешней цепи. В установившемся режиме для гальванометра имеет место равенство: $\alpha_{cm} = (B_0 \cdot w \cdot s / W) \cdot I = S_i \cdot I$. Величина S_i , равная углу отклонения подвижной части гальванометра при протекании тока I А, называется чувствительностью гальванометра по току. Выражая ток через напряжение рамки гальванометра ($I = U / R_z$), последнее равенство можно записать в виде: $\alpha_{cm} = S_i \cdot U / R_z = S_u \cdot U$, где S_u – чувствительность гальванометра по напряжению. Чувствительность гальванометра можно увеличить, уменьшая жесткость подвески или изменяя число витков катушки. Если у магнитоэлектрического гальванометра увеличить массу подвижной системы так, чтобы она имела достаточно большой период собственных колебаний (порядка нескольких секунд), то он приобретает особое свойство – реагировать не на значение тока, а на количество электричества, прошедшего через рамку за время, существенно меньшее периода T_0 собственных колебаний. Увеличение массы подвижной части осуществляется с помощью двух или четырех дополнительных грузиков (рис.12.а).

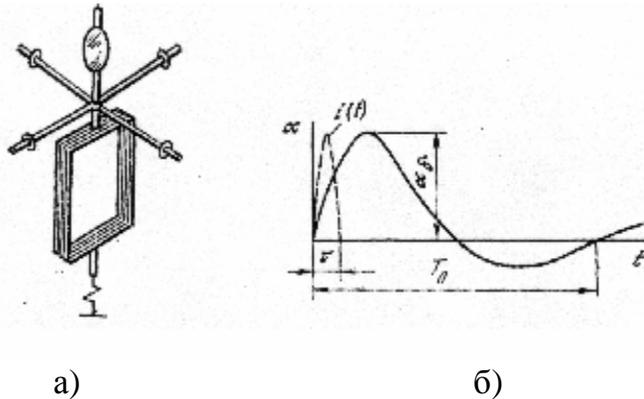


Рис.12

Гальванометры, предназначенные для измерения количества электричества и отличающиеся увеличенным моментом инерции, называются баллистическими. Если через катушку такого гальванометра пропустить ток $i(t)$ в течение времени $t \ll T_0$ (где T_0 – период собственных колебаний подвижной части прибора), то общее количество электричества, прошедшее через гальвано-

метр за время τ , равно: $Q = \int_0^{\tau} i(t) dt$. В результате взаимодействия тока $i(t)$ с магнитным полем катушки подвижная система получит импульс силы $\int_0^{\tau} F dt$, под влиянием которого она будет отброшена на некоторый угол α_0 (рис.12.б). Затем она возвратится в исходное состояние аperiodически или совершив несколько колебаний. Угол отклонения подвижной части пропорционален количеству электричества, прошедшего через гальванометр, если продолжительность протекания тока не превышает 10% периода T_0 собственных колебаний: $\alpha_0 = (B_0 \cdot w \cdot s \cdot \omega_0 / W) \cdot Q = S_i \cdot (2\pi/T_0) \cdot Q = S_0 \cdot Q$, где S_0 – баллистическая чувствительность, определяемая как амплитуда первого отклонения подвижной части гальванометра в миллиметрах шкалы, отстоящей на один метр от зеркальца, получающегося при протекании через гальванометр количества электричества, равного 1 Кл. Величина, обратная баллистической чувствительности, называется баллистической постоянной.

2.7. Выпрямительные приборы

Выпрямительные приборы представляют собой сочетание магнитоэлектрического измерительного механизма с полупроводниковым выпрямителем (рис.13). Выпрямитель преобразует переменный ток в пульсирующий, который

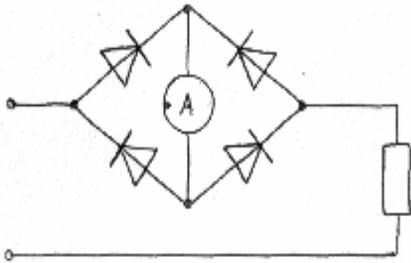


Рис.13.

измеряется магнитоэлектрическим прибором (А). Вращающий момент прибора пропорционален мгновенному значению тока, но вследствие инерции его подвижной системы отклонение стрелки прибора пропорционально среднему значению вращающего момента за период или среднему значению выпрямленного тока: $\alpha = S_i \cdot I_{cp}$.

Шкала выпрямительного прибора может быть проградуирована в действующих значениях, если в цепи течет переменный ток, так как действующее I и среднее I_{cp} значение связаны соотношением $I = [\pi/(2\sqrt{2})] \cdot I_{cp} = 1,11 \cdot I_{cp}$. Однако для измерения действующих значений несинусоидальных токов выпрямительные приборы нельзя использовать.

К достоинствам выпрямительных приборов относятся высокая чувствительность, малая собственная потребляемая мощность, возможность использования для измерений при повышенных частотах (без частотной компенсации – до 2 кГц, с частотной компенсацией – до 40 кГц). Высший класс точности таких приборов равен 1,0.

3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

3.1. Электромагнитный измерительный механизм

Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, создаваемого измеряемым током, со стальным сердечником, помещенным в это поле. Неподвижная катушка I состоит из каркаса с навитой изолированной медной проволокой или медной лентой (рис.14.а). При протекании измеряемого тока по обмотке катушки в ее плоской щели 2 создается магнитное поле. На оси 3 эксцентрично укреплен сердечник 4 из магнитомягкой стали стрелкой 5 . Магнитное поле катушки намагничивает сердечник и втягивает его внутрь щели, поворачивая ось со стрелкой прибора. Этому повороту препятствует закручивающаяся спиральная пружина 6 , создающая противодействующий момент.

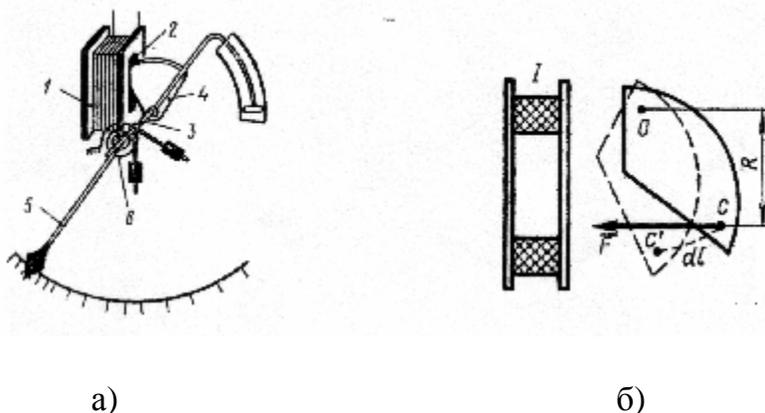


Рис.14

Катушка с током I создает магнитное поле, которое намагничивает стальной сердечник и создает силу F , стремящуюся повернуть сердечник вокруг оси (рис.14.б). При перемещении точки C сердечника по дуге $d\ell$ совершается работа $dA_{ep} = F \cdot d\ell = F \cdot R \cdot d\alpha$, где R – радиус вращения точки C , $d\alpha$ – центральный угол, соответствующий дуге $d\ell$. Работа dA_{ep} совершается за счет энергии dW_m магнитного поля катушки, то есть $dW_m = F \cdot R \cdot d\alpha$, следовательно, $dW_m = F \cdot R$. Учитывая, что энергия магнитного поля катушки с индуктивностью L равна $W_m = L \cdot I^2 / 2$, можно выразить вращающий момент:

$$M_{ep} = F \cdot R = dW_m / d\alpha = (I^2 / 2) \cdot (dL / d\alpha).$$

Повороту сердечника противодействует спиральная пружина, создающая момент силы: $M_{np} = k \cdot \alpha$, где k – жесткость пружины.

При достижении равновесия $M_{cp} = M_{np}$. Подстановка в данное равенство соотношений для вращающего и противодействующего моментов позволяет выразить угол поворота: $\alpha = (I^2/2k) \cdot (dL/d\alpha)$. Величина $dL/d\alpha = f(\alpha)$ сильно зависит от формы сердечника. Полагая, что в пределах поворота сердечника $dL/d\alpha = \text{const}$, можно выразить угол поворота подвижной системы: $\alpha = c \cdot I^2$, где $c = (1/2k) \cdot (dL/d\alpha)$.

Полученный результат показывает, что шкала электромагнитного прибора неравномерная. Она должна быть квадратичной, то есть сжатой в начале и растянутой в конце. Однако, варьируя формой сердечника и его расположением в щели катушки (что приводит к изменению множителя $dL/d\alpha$), можно существенно улучшить характер шкалы, сделав ее практически равномерной в рабочей части.

Направление отклонения стрелки прибора не зависит от направления тока в катушке, так как при изменении направления тока одновременно изменяется направление вектора магнитной индукции внутри катушки и в сердечнике, а характер их взаимодействия не изменяется. Этот же вывод следует и из выражения для вращающего момента, в которое значение тока входит во второй степени. Поэтому приборы электромагнитной системы пригодны и для измерения переменных токов. При измерении переменного тока подвижная система прибора поворачивается на некоторый угол, определяемый средним значением вращающего момента за период. Определим вращающий момент подвижной системы прибора. Пусть, например, измеряемый ток изменяется по закону синуса: $i(t) = I_m \cdot \sin \omega t$, где I_m – амплитудное значение тока, $\omega = 1/(2\pi f)$, f – частота переменного тока. Тогда мгновенное значение вращающего момента равно: $M = k \cdot I^2$, а среднее за период значение этого момента равно: $M_{cp} = (1/T) \int_0^T k i^2 dt = k \cdot I^2$.

Таким образом, среднее значение вращающего момента, действующего на подвижную систему электромагнитного прибора при измерениях переменного тока, пропорционально второй степени действующего значения переменного тока. Квадратичная зависимость угла поворота подвижной системы электромагнитного прибора от тока имеет простое физическое объяснение: ток в катушке создает магнитное поле, которое поворачивает сердечник. В результате намагниченный сердечник взаимодействует с катушкой, при этом намагниченность сердечника изменяется вместе с изменением тока в катушке.

Электромагнитные приборы применяются как амперметры и как вольтметры. В последнем случае обмотка содержит большое число витков медной проволоки.

Применение стальных сердечников в электромагнитных приборах обуславливает разные показания при измерениях в цепях постоянного и переменного токов, поскольку в цепях переменного тока добавляются потери на гистерезис и вихревые токи. Поэтому электромагнитные приборы, как правило, градуируют либо для постоянного либо для переменного тока. Для уменьшения погрешности вследствие гистерезиса сердечники некоторых приборов (класс точности 0,2) изготавливают из специального сплава - пермаллоя с особо малым значением коэрцитивной силы. Для уменьшения влияния внешних полей у некоторых приборов применяют астатические измерительные механизмы.

Для успокоения колебаний подвижной системы в электромагнитных приборах с плоской катушкой применяют воздушные успокоители, а в приборах с круглой катушкой – чаще магнитоиндукционные.

Достоинствами электромагнитных приборов являются: 1) простота конструкции; 2) способность выдерживать большие перегрузки; 3) пригодность для измерения постоянных и переменных токов; 4) невысокая стоимость и возможность широкого использования в качестве щитовых приборов.

Недостатками электромагнитных приборов являются: 1) неравномерная шкала; 2) влияние внешних магнитных полей на показания приборов; 3) малая чувствительность и точность (класс точности не выше 1,0).

3.2. Электромагнитные амперметры

В электромагнитных амперметрах катушку включают последовательно в цепь измеряемого тока. Для работы измерительного механизма необходимо создать определенную величину магнитодвижущей силы wI (не менее 200-250 А). Таким образом, при измерении тока силой 200-250 А можно использовать катушку, содержащую один виток.

Изменение пределов измерения амперметров производят посредством секционирования обмоток катушек и включением секций последовательно или параллельно. Применение шунтов для расширения пределов измерения электромагнитных амперметров нерационально, так как это приводит к повышению стоимости, а также к увеличению мощности, потребляемой приборами. Пределы измерения электромагнитных амперметров расширяют с помощью измерительных трансформаторов тока (TrT) (рис.15.а). Первичная обмотка трансформатора тока содержит меньшее число витков, чем вторичная и включается последовательно в цепь измеряемого тока I_1 (к зажимам L_1 и L_2), а к зажимам I_1 и I_2 вторичной обмотки подключается амперметр A . Измеряемый ток определяют посредством умножения показаний амперметра на номинальный коэффициент трансформации $k_{ином}$: $I_x = I_1 = I_2 \cdot k_{ином}$.

Шкала амперметра может быть отградуирована в значениях силы измеряемого тока. В паспорте измерительного трансформатора указывают также предельное значение сопротивления, на которое может быть замкнута вторичная обмотка. Номинальным режимом для трансформатора является режим короткого замыкания. При размыкании вторичной цепи трансформатора резко повышается напряжение во вторичной обмотке от единиц вольт до нескольких киловольт, что опасно, так как может привести к перегреву сердечника трансформатора и пробоем изоляции. Во избежание размыкания в схеме включения трансформатора используют ключ K , который необходимо замкнуть прежде, чем отключать амперметр. Вторичная обмотка трансформатора тока заземлена для того, чтобы при случайном пробое изоляции между первичной и вторичной обмоткой обезопасить обслуживающий персонал от контакта с цепью высокого напряжения. Для трансформатора тока характерны погрешности при передаче значений тока и фазы.

3.3. Электромагнитные вольтметры

Измерительная цепь электромагнитного вольтметра содержит неподвижную катушку и добавочное сопротивление, соединенные последовательно. Как и в амперметрах, в вольтметрах для обеспечения работы измерительного механизма необходимо создать определенную магнитодвижущую силу. Для вольтметров с пределами измерения от $1,5$ до 15 В ток полного отклонения измерительной системы составляет 90 мА, а для пределов измерения 75 В и выше ток полного отклонения равен $7,5$ мА.

Для измерения малых напряжений электромагнитными вольтметрами производят секционирование обмоток катушек, причем секции включают последовательно или параллельно. Для расширения пределов измерения до 600 В применяют добавочные резисторы. Для измерения напряжений, превышающих 600 В, используют измерительные трансформаторы напряжения TrH (рис.15.б, здесь A, X – зажимы первичной обмотки, a, x – зажимы вторичной

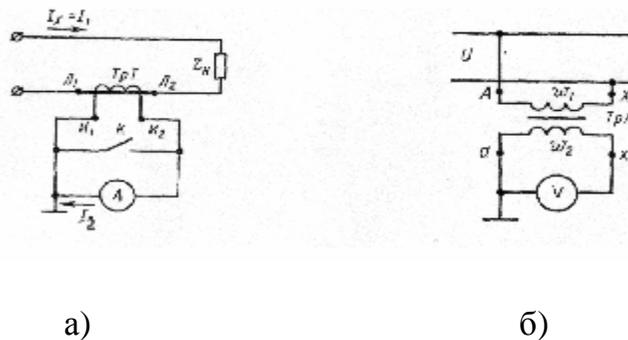


Рис.15.

обмотки). Первичную обмотку трансформатора подключают параллельно участку цепи, на котором требуется измерить напряжение U_1 . Вторичную обмотку с напряжением U_2 и меньшим числом витков соединяют с вольтметром. Вторичная обмотка замкнута на большое сопротивление, вследствие чего токи в обмотках малы и измерительный трансформатор напряжения работает в условиях, близких к холостому ходу.

Трансформатор напряжения представляет собой маломощный силовой трансформатор. Измеряемое напряжение измеряют посредством умножения показаний вольтметра U_2 на номинальный коэффициент трансформации $k_{U_{ном}}$, то есть $U_x = U_1 = U_2 \cdot k_{U_{ном}}$. Шкала вольтметра может быть отградуирована в значениях первичного напряжения. Для трансформатора напряжения характерны погрешности, обусловленные передачей значений напряжения и фазы.

3.4. Электромагнитные логометры

Электромагнитные логометры используют для измерения частоты, емкости и других физических величин. Как и в логометрах других систем, в электромагнитном логометре противодействующий момент создается аналогично вращающему.

Электромагнитный логометр представляет собой измерительный механизм с двумя неподвижными катушками, укрепленными на оси (рис.16). Характерной особенностью электромагнитных логометров является отсутствие токо-

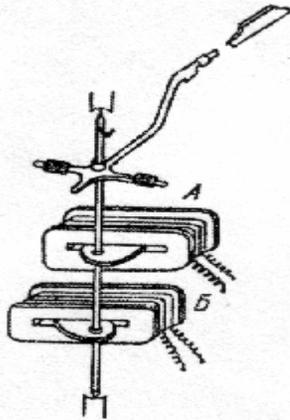


Рис.16.

подводов к подвижной части, по которой измеряемые токи не проходят. На каждый из сердечников A и B логометра действует вращающий момент, значение которого зависит от второй степени тока соответствующей катушки и угла поворота подвижной системы, а знак вращающего момента определяется знаком производной dL/da . Для того чтобы вращающие моменты имели противоположные знаки, сердечники укрепляют на оси так, чтобы при изменении угла α индуктивность одной из катушек увеличивалась ($dL_1 > 0$), а другой – уменьшалась ($dL_2 < 0$).

При измерении подвижная часть устанавливается в таком положении, при котором моменты сил уравниваются друг друга, то есть $M_1 = M_2$, следовательно, $I_1^2 \cdot f_1(\alpha) = I_2^2 \cdot f_2(\alpha)$. Полученное соотношение можно преобразовать к виду: $I_1^2 / I_2^2 = f_1(\alpha) / f_2(\alpha) = f_3(\alpha)$ и выразить угол отклонения подвижного механизма

$$\alpha = F(I_1^2/I_2^2).$$

Таким образом, угол поворота подвижного механизма является функцией отношения квадратов токов в катушках логометра.

4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

4.1. Электромагнитный измерительный механизм

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии магнитных полей двух катушек, по которым течет измеряемый ток. Неподвижная катушка 1 состоит из двух секций для создания одно-

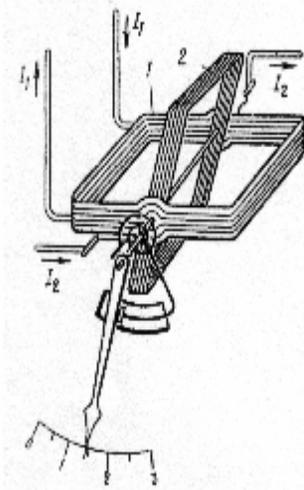


Рис.17.

родного магнитного поля (рис.17). Легкая подвижная катушка 2 помещается внутри неподвижной и жестко скрепляется с осью и стрелкой. Для подвода тока в подвижную катушку и создания противодействующего момента применяют спиральные пружины, которые электрически изолированы от оси. На оси подвижной катушки закреплено также крыло воздушного успокоителя. Для повышения чувствительности и класса точности прибора обмотка подвижной катушки выполняется из тонкой изолированной проволоки.

При протекании тока по катушкам электродинамического измерительного механизма ток подвижной катушки I_2 взаимодействует с магнитным потоком Φ_1 , создаваемым током I_1 неподвижной катушки. Поворот подвижной катушки происходит за счет энергии магнитного поля катушек, поэтому вращающий момент $M_{\text{вп}}$, действующий на подвижную катушку, равен:

$$M_{\text{вп}} = dW_m / d\alpha,$$

где W_m – энергия магнитного поля катушек, α – угол поворота подвижной катушки. Энергия магнитного поля W_m подвижной системы двух катушек складывается из энергии катушек и энергии, обусловленной их взаимной индукцией, то есть $W_m = L_1 \cdot I_1^2 / 2 + L_2 \cdot I_2^2 / 2 + M_{12} \cdot I_1 \cdot I_2$, где L_1 и L_2 – индуктивности катушек, M_{12} – коэффициент их взаимной индуктивности. Подстановка данного выражения в уравнение вращающего момента дает: $M_{\text{вп}} = dW_m / d\alpha = (I_1^2 / 2) \cdot (dL_1 / d\alpha) + (I_2^2 / 2) \cdot (dL_2 / d\alpha) + I_1 \cdot I_2 \cdot (dM_{12} / d\alpha)$. Поскольку индуктивности L_1 и L_2 – постоянны для данного прибора, то $dL_1 = dL_2 = 0$ и $M_{\text{вп}} = I_1 \cdot I_2 \cdot (dM_{12} / d\alpha)$. Величина $dM_{\text{вп}} / d\alpha = f(\alpha)$ сильно зависит от формы катушек и постоянна для данного прибора, то есть $dM_{\text{вп}} / d\alpha = \text{const} = k_1$, поэтому $M_{\text{вп}} = k_1 \cdot I_1 \cdot I_2$.

Поворот подвижной системы происходит до наступления равновесия между вращающим $M_{\text{вр}}$ и противодействующим $M_{\text{пр}}$ моментом, создаваемым спиральной пружиной: $k_1 \cdot I_1 \cdot I_2 = k_2 \cdot \alpha$, где k_2 – жесткость пружины. Тогда угол поворота подвижной системы может быть описан уравнением: $\alpha = k \cdot I_1 \cdot I_2$, где $k = k_1 / k_2$ – постоянная данного прибора. Таким образом, угол поворота подвижной системы электродинамического прибора в случае постоянного тока пропорционален произведению токов в катушках.

В случае переменных токов, например, если $i_1 = I_{m1} \cdot \sin \omega t$ и $i_2 = I_{m2} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$, мгновенный вращающий момент $m_{\text{вр}}$ равен: $m_{\text{вр}} = k \cdot i_1 \cdot i_2$, а средний за период момент равен:

$$M_{\text{ср}} = (1/T) \cdot \int_0^T m dt = k_1 \cdot (1/T) \cdot \int_0^T i_1 \cdot i_2 \cdot dt = k_1 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi.$$

Приравнивая средний за период вращающий момент $M_{\text{ср}}$ и противодействующий момент $M_{\text{пр}}$, можно получить выражение угла отклонения подвижной системы измерительной системы: $\alpha = k \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi$.

Пригодность электродинамических приборов для измерения переменных токов объясняется тем, что направления токов в обеих катушках изменяются одновременно или с постоянным сдвигом по фазе, а следовательно, направление поворота подвижной катушки остается неизменным.

К достоинствам электродинамических приборов относятся: высокая точность, что позволяет применять их в лабораторной практике в качестве контрольных измерительных приборов, а также пригодность для измерения как постоянных, так и переменных токов. К недостаткам электродинамических приборов следует отнести неравномерность шкалы, большую чувствительность к перегрузкам (вследствие наличия токоведущих пружин), влияние внешних магнитных полей и высокую стоимость.

Приборы электродинамической системы изготавливают в основном как переносные лабораторные приборы классов точности $0,1$; $0,2$ и $0,5$.

4.2. Электродинамические амперметры и вольтметры

В зависимости от назначения прибора катушки в нем могут быть соединены либо последовательно – в вольтметре (рис.18.а), либо параллельно – в амперметре (рис.18.б), либо включены в различные цепи – в ваттметре (рис.18.в). Из выражения вращающего момента $M_{\text{вр}} = k_1 \cdot I_1 \cdot I_2$ следует, что изменение направления тока в какой-либо одной из катушек приведет к изменению направления поворота подвижной системы на противоположное. У вольтметров и амперметров взаимное соединение концов обмоток сделано внутри прибора, а к зажимам прибора выведены два провода, подключаемые в цепь.

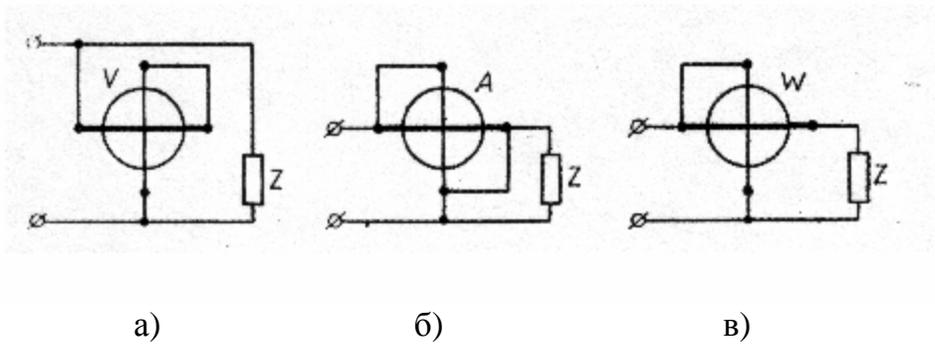


Рис.18

Шкалы электродинамических амперметров и вольтметров неравномерные, так как токи в обеих катушках пропорциональны одной и той же измеряемой величине. В обеих катушках вольтметра течет один и тот же ток, поэтому $I_1 = I_2 = I$ и $\alpha = k \cdot I^2$, следовательно, у вольтметра квадратичная шкала. В катушках амперметра токи связаны соотношением: $I_1/I_2 = R_2/R_1$, где R_1 и R_2 – сопротивления подвижной и неподвижной катушек. Из полученных соотношений следует:

$$(I_1 + I_2)/I_1 = R_2/(R_1 + R_2) \text{ и } I_1 = (I_1 + I_2) \cdot R_2/(R_1 + R_2).$$

Учитывая, что $I_1 + I_2 = I$, и вводя обозначение $R_2/(R_1 + R_2) = k_1$, выражения для токов I_1 и I_2 можно преобразовать к виду: $I_1 = k_1 \cdot I$; $I_2 = k_2 \cdot I$, тогда $\alpha = k_3 \cdot I^2$, то есть у амперметра шкала также квадратичная. Однако при проектировании приборов добиваются того, чтобы шкала была практически равномерной в ее рабочей части подбором взаимного расположения катушек и их формы.

На показания электродинамических прибором могут влиять внешние магнитные поля, поскольку собственное поле катушек слабое. Для устранения этого влияния применяют астатические измерительные механизмы.

4.3. Астатические измерительные механизмы

Собственное магнитное поле электродинамических и электромагнитных измерительных механизмов является относительно слабым, вследствие того, что линии магнитной индукции замыкаются через воздух. По этой причине внешние магнитные поля существенно влияют на показания электромагнитных и электродинамических приборов. Для устранения влияния внешних магнитных полей применяют экранирование приборов кожухами из магнитомягкой стали. Почти полное устранение влияния внешнего магнитного поля может быть достигнуто применением астатических измерительных механизмов.

Астатический измерительный механизм содержит два элемента, построенных совершенно одинаково, но магнитные поля этих элементов, равные по величине и тождественные по конфигурации, имеют противоположное направление. Благодаря этому внешнее магнитное поле настолько же ослабляет поле одного измерительного элемента, насколько увеличивает магнитное поле другого элемента. Таким образом, результирующий вращающий момент прибора практически не изменяется при воздействии внешнего магнитного поля.

Астатический электромагнитный измерительный прибор содержит два сердечника, укрепленных на общей оси, и две неподвижные катушки, обмотки которых соединены последовательно так, чтобы создаваемые ими магнитные поля были направлены в противоположные стороны (рис.19.а). Внешнее магнитное поле уменьшает поле, действующее на один сердечник, и увеличивает в той же мере поле, действующее на другой, в результате чего суммарный вращающий момент не зависит от внешнего магнитного поля. Однако полное устранение погрешности, обусловленной внешним магнитным полем, возможно лишь при условии, если это поле равномерно распределено в объеме измерительного механизма, а показатель степени n входной величины измерительного механизма равен единице.

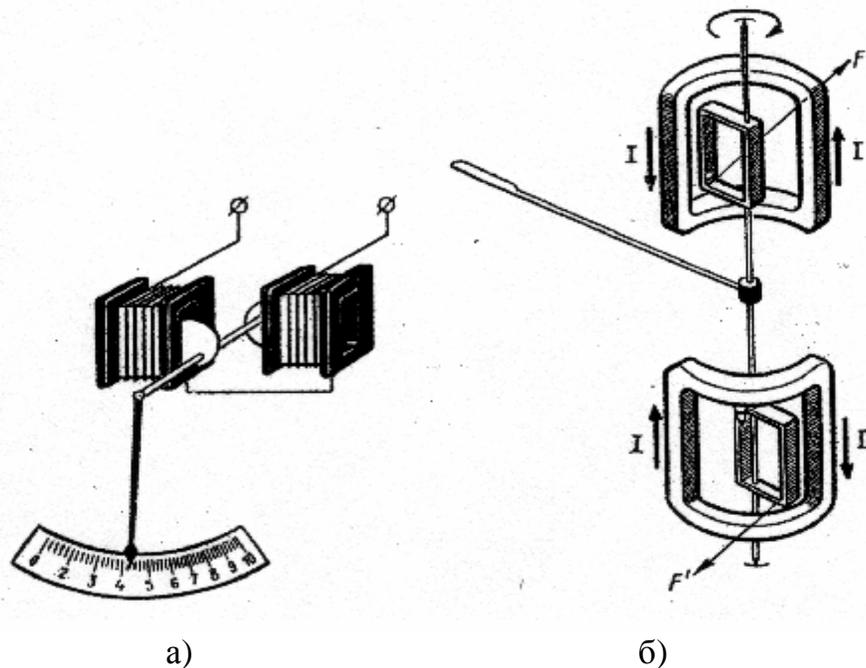


Рис.19

Астатические измерительные механизмы электродинамической системы содержат две неподвижные и две подвижные катушки (рис.19.б). Токи I в неподвижных катушках направлены так, что они создают противоположно направленные магнитные поля. Токи в подвижных катушках также имеют различные направления. Таким образом, вращающие моменты, создаваемые этими парами катушек, совпадают по направлению, что приводит к повышению чувствительности прибора, однако действие внешнего магнитного поля на первую систему полностью компенсируется противоположным действием на вторую, и погрешность, обусловленная действием внешнего магнитного поля, оказывается равной нулю.

4.4. Ферродинамические приборы

Значение вращающего момента, действующего на подвижную часть электродинамических приборов, может быть увеличено за счет использования магнитной цепи из ферромагнитных материалов. Такие приборы называются ферродинамическими.

Ферродинамический прибор содержит стальной сердечник 2, на который надета неподвижная катушка 1, состоящая из двух секций (рис.20). В воздушном зазоре между сердечником и стальным цилиндром 4

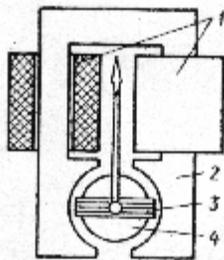


Рис.20

может вращаться подвижная катушка 3. Такой прибор очень похож на магнитоэлектрический, в котором роль постоянного магнита выполняет катушка с током. Взаимодействие тока подвижной катушки с магнитным полем в воздушном зазоре создает вращающий момент, который, как и в электродинамическом измерительном механизме, пропорционален произведению действующих значений токов катушек и косинусу угла сдвига между ними. Благодаря малому магнитному сопротивлению магнитной цепи в воздушном зазоре могут быть получены значительная магнитная индукция, а следовательно, и большой вращающий момент.

Использование стального сердечника приводит к повышению чувствительности и ослаблению влияния внешних магнитных полей на показания прибора, но вместе с тем появляются погрешности, обусловленные гистерезисом и вихревыми токами, что приводит к уменьшению точности прибора.

К достоинствам ферродинамических приборов относятся большой вращающий момент, сильное собственное магнитное поле, исключаяющее внешние влияния, и меньшее, чем у электродинамических, собственное потребление мощности. Однако на метрологические свойства таких приборов оказы-

вают влияние частота тока и температура окружающей среды. Класс точности ферродинамических приборов, как правило, составляет 1,0 и 1,5.

4.5. Электродинамические логометры

Электродинамический логометр устроен аналогично магнитоэлектрическому, но магнитные поля в нем создаются электромагнитами. Подвижная часть логометрического механизма выполнена в виде двух катушек, жестко скрепленных между собой и закрепленных на одной оси (рис.21.а). При взаимодействии магнитного потока, создаваемого током неподвижной катушки, с двумя токами подвижных катушек I_{n1} и I_{n2} , возникают два вращающих момента. Вариацией взаимного расположения катушек и направлением токов в них достигают того, чтобы создаваемые моменты были направлены в противоположные стороны. Значения моментов сил, создаваемых в механизмах прибора, определяются формулами:

$$M_{ep1} = I_n \cdot I_{n1} \cdot \cos \psi_1 \cdot (dM_{n,n1} / d\alpha); \quad M_{ep2} = I_n \cdot I_{n2} \cdot \cos \psi_2 \cdot (dM_{n,n1} / d\alpha);$$

где ψ_1 и ψ_2 - углы между векторами токов соответственно I_n, I_{n1} и I_n, I_{n2} ; $M_{n,n1}$ и $M_{n,n2}$ - взаимные индуктивности между подвижной и неподвижной катушками (рис.21.б).

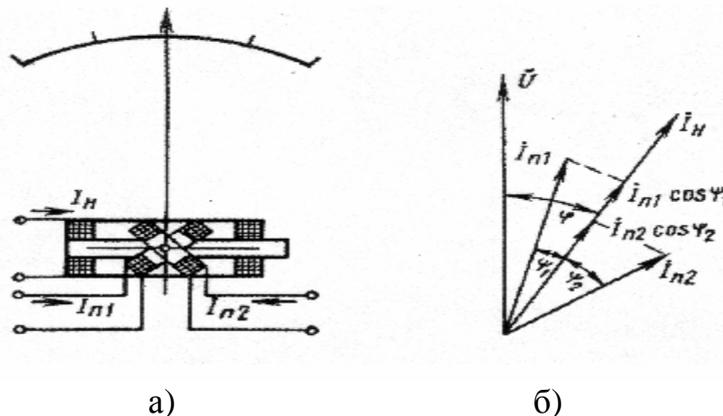


Рис.21

Под действием этих моментов подвижная часть прибора перемещается до достижения равенства моментов сил ($M_{ep1} = M_{ep2}$):

$$[(I_{n1} \cdot \cos \psi_1) / (I_{n2} \cdot \cos \psi_2)] \cdot (dM_{n,n1} / dM_{n,n2}) = F(\alpha).$$

Следовательно, угол перемещения подвижной части логометрического механизма - это функция отношения проекций векторов токов в неподвижных и подвижных катушках:

$$\alpha = F[(I_{n1} \cdot \cos \psi_1) / (I_{n2} \cdot \cos \psi_2)].$$

Электродинамические логометрические механизмы применяют в переносных и щитовых фазометрах и частотомерах.

4.6. Электродинамические ваттметры

Для измерения мощности в цепях постоянного и переменного тока применяют электродинамические ваттметры. Неподвижная катушка 1 включается последовательно с нагрузкой, поэтому она называется последовательной или токовой катушкой (рис.22). Подвижная катушка 2 вместе с добавочным резистором R_0 , которая позволяет расширить диапазон измерений ваттметра по току и способствует уменьшению погрешности измерений, включается параллельно нагрузке на напряжение U . Поэтому она называется параллельной обмоткой или цепью напряжения.

По параллельной цепи течет ток $I_u = U/R_u$, где $R_u = R_0 + R_2$ – сопротивление параллельной цепи, R_2 – сопротивление параллельной обмотки. Угол поворота подвижного механизма прибора равен:

$$\alpha = k \cdot I \cdot I_u = k \cdot I \cdot (U/R_u) = (k/R_u) \cdot I \cdot U = k_1 \cdot P.$$

Таким образом, угол поворота подвижного механизма пропорционален мощности P . Следовательно, ваттметр имеет равномерную шкалу.

Изменение направления тока в одной из катушек вызывает изменение направления вращающего момента и, следовательно, направления поворота подвижной рамки. Это делает отсчет по шкале невозможным, так как у прибора односторонняя шкала.

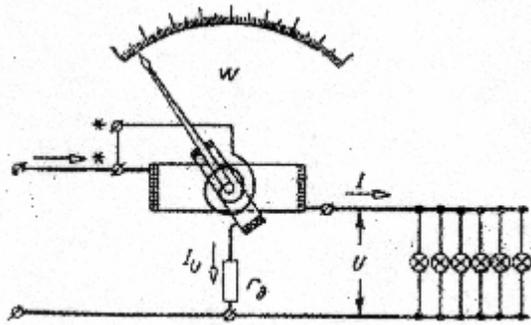


Рис. 22

Поэтому необходимо различать зажимы ваттметра. Зажим последовательной цепи, соединяемый с источником питания, называется генераторным. Зажим параллельной цепи, соединяемый с последовательной катушкой, также называется генераторным. Генераторные зажимы обозначаются символом *. Таким образом, ваттметр имеет четыре зажима: два зажима токовых и два зажима напряжения. При правильном включении

ваттметра токи в его катушках направлены от генераторных зажимов к зажимам, называемым нагрузочными.

Цена деления ваттметра определяется из соотношения: $c = U_n \cdot I_n / \alpha_n$, где α_n – число делений шкалы. Например, если $I_n = 5 \text{ A}$; $U_n = 300 \text{ B}$; $\alpha_n = 150$, то $c = 5 \cdot 300 / 150 = 10 \text{ Вт/дел}$.

В зависимости от сопротивления нагрузки различают две схемы включения ваттметров, отличающиеся способом соединения параллельной цепи (рис.23).

При подключении ваттметра по схеме, представленной на рис.23.а, параллельная цепь ваттметра находится под напряжением U_{ex} , большим, чем напряжение U на нагрузке Z на величину падения напряжения U_i на токовой катушке. Следовательно, мощность, измеряемая ваттметром, равна:

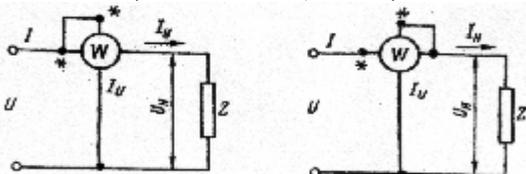


Рис.23

$P_x = I \cdot U_{ex} = I \cdot (U + U_i) = P + P_i$, где P – мощность нагрузки, P_i – мощность токовой катушки. Если $Z \gg R_i$, то $P \gg P_i$ и методическая погрешность измерения мощности, равной $\delta = P_i / P$, можно пренебречь. Поэтому схема включения ваттметра, представленная на рис.23.а, применяется для

измерения мощности нагрузки с большим сопротивлением.

При включении ваттметра по схеме, приведенной на рис.23.б, ток $I + I_u$ в последовательной катушке ваттметра превышает величину тока I нагрузки на величину тока в параллельной цепи, напряжение которой равно напряжению нагрузки U . В этом случае мощность, измеряемая ваттметром, равна: $P_x = (I + I_u) \cdot U = I \cdot U + I_u \cdot U = P + P_u$, а методическая погрешность определения мощности $\delta = Z/R_u$ пропорциональна сопротивлению нагрузки. Поэтому схема включения ваттметра, представленная на рис.23.б, применяется для измерения мощности низкоомной нагрузки.

При точных измерениях мощности необходимо вводить поправки, обусловленные потерями мощности в последовательной (P_i) и в параллельной (P_u) катушках. Поскольку $P_i \ll P_u$, то показания ваттметра, включенного по схеме, приведенной на рис.23.а, будут более точными. Поэтому при измерении активной мощности в однофазной цепи электродинамический ваттметр включают преимущественно по схеме рис.23.а.

В цепи переменного тока с напряжением $u = U \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t$ и током $i = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ ток в катушке напряжения с сопротивлением Z_u равен $i_u = (U \cdot \sqrt{2} / Z_u) \cdot \sin(\omega t - \varphi_u)$ и отстает по фазе от напряжения на угол φ_u (рис.24), тангенс которого равен $\operatorname{tg} \varphi_u = x_u / r_u$, где x_u и r_u – соответственно реактивное и активное сопротивление катушки напряжения. Угол поворота подвижной системы электродинамического ваттметра при измерении мощности переменного тока описывается уравнением: $\alpha = k \cdot I \cdot I_u \cdot \cos(\varphi - \varphi_u) = k \cdot I \cdot I_u \cdot \cos \psi$. Полагая сопротивление цепи напряжения Z_u постоянным, можно записать: $\alpha = k \cdot I \cdot (U / Z_u) \cdot \cos \psi = (k / Z_u) \cdot I \cdot U \cdot \cos \psi = k_2 \cdot I \cdot U \cdot \cos \psi$. Поскольку сопротивление цепи напряжения Z_u можно считать активным (для этого параллельно R_δ включают конденсатор, который компенсирует индуктивное сопротивление обмотки), то есть

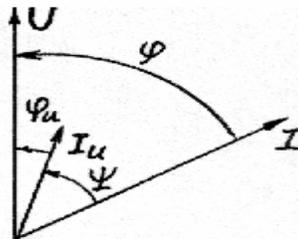


Рис.24

$x_u \approx 0$, то $\operatorname{tg} \varphi_u = x_u / r_u \approx 0$, следовательно $\varphi_u \approx 0$ и $\psi \approx \varphi$. Таким образом, угол поворота $\alpha = k_2 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi \approx k_2 P$ подвижной системы ваттметра пропорционален активной мощности.

В случае равенства полного сопротивления цепи напряжения ее активному сопротивлению показания ваттметра в цепи постоянного и переменного тока будут одинаковы. Это дает возможность производить градуировку и поверку ваттметра при постоянном токе.

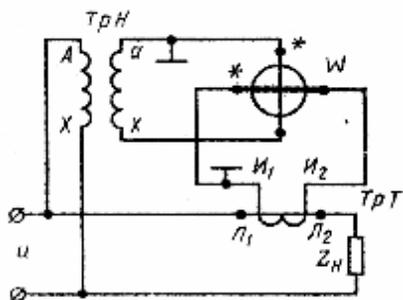


Рис.25

При выводе формулы угла поворота $\alpha = k_2 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi \approx k_2 P$ предполагалось, что $\varphi_u \approx 0$, поскольку индуктивность подвижной катушки ничтожно мала. Для уменьшения погрешности, вызванной этим допущением, параллельно резистору R_0 следует включить компенсационный конденсатор, емкость которого равна $C_k = L_{подв} / R_0^2$, где

$L_{подв}$ – индуктивность подвижной катушки.

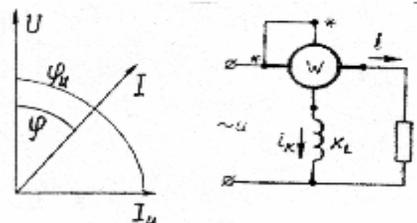
В цепях, сила тока или напряжение которых превышает диапазон измерений прибора по току или напряжению, ваттметры включают через измерительные трансформаторы тока (TpT) и напряжения (TpH) (рис.25). При этом мощность цепи определяется как произведение показания ваттметра P_w на номинальный коэффициент трансформации тока (k_i) и напряжения (k_u), то есть $P = P_w \cdot k_i \cdot k_u$.

Для измерения реактивной мощности (Q) в цепи синусоидального тока необходимо, чтобы в формуле $\alpha = k_2 \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi$ косинус угла φ был заменен на синус. Для этого необходимо, чтобы угол (φ_u) сдвига фаз между током и напряжением был равен 90° (рис.26.а). Тогда угол поворота подвижной системы ваттметра будет равен:

$$\alpha = k_2 \cdot I \cdot U \cdot \cos(\varphi - \varphi_u) \approx k_2 \cdot I \cdot U \cdot \cos(\varphi - 90^\circ) = k_2 \cdot I \cdot U \cdot \sin \varphi = k_2 \cdot Q.$$

Таким образом, угол поворота подвижной системы ваттметра пропорционален реактивной мощности. Требуемый фазовый сдвиг ($\varphi_u = 90^\circ$) между напряжением и током в параллельной цепи достигается за счет включения в параллельную цепь дополнительного резистора и катушки (рис.26.б).

Для рассмотренных схем характерна зависимость показаний ваттметра от частоты тока, поскольку частота влияет на реактивное сопротивление и фазовый сдвиг между током и напряжением в параллельной цепи ваттметра. Измерение реактивной мощности имеет смысл лишь в цепях с приемниками Z_H ,



а)

б)

Рис.26

потребляющими большую мощность и питаемыми от источников трехфазного тока, поэтому измерения реактивной мощности в однофазных цепях выполняют только в лабораторных условиях.

4.7. Однофазный фазометр

Прибор, предназначенный для непосредственного измерения угла (φ) сдвига фаз между напряжением и током или коэффициента мощности ($\cos\varphi$), называется фазометром. Наибольшее распространение получили фазометры электродинамической системы.

Фазометр состоит из неподвижной катушки K , выполняемой, как правило, в виде двух секций, соединенных последовательно с нагрузкой Z , на которой измеряется коэффициент мощности, и двух подвижных катушек K_1 и K_2 , помещенных внутри неподвижной (рис.27.а). Подвижные катушки жестко скреплены между собой под некоторым углом, например 90° , и укреплены на общей оси, образуя подвижную систему прибора вместе со стрелкой. Обе параллельные катушки включаются параллельно нагрузке, но одна (K_1) – через активное сопротивление R , а другая (K_2) – через большое индуктивное сопротивление (x_L) (рис.27.б). Противостоящих пружин фазометр не имеет, поэтому у отключенного прибора его подвижная система вместе со стрелкой занимает произвольное положение.

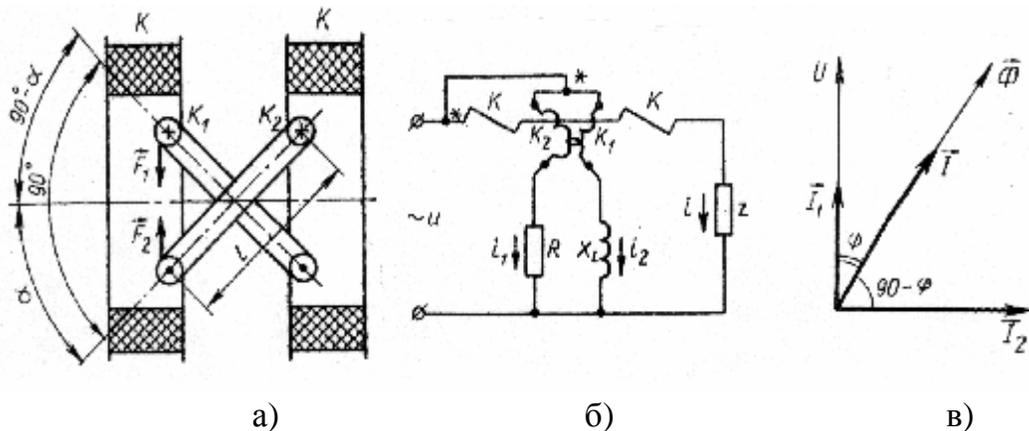


Рис.27

Для вывода зависимости угла поворота подвижного механизма фазометра от угла сдвига фаз между током и напряжением, необходимо построить его векторную диаграмму (рис.27.в). Для этого следует произвольно расположить вектор напряжения U . Если нагрузка имеет индуктивный характер, ток I отстает по фазе от напряжения U на некоторый угол φ . Магнитный поток Φ , создаваемый током I неподвижной катушки K , совпадает по фазе с током I .

Ток I_1 в катушке K_1 совпадает по фазе с напряжением U , поскольку цепь этой катушки содержит активное сопротивление R . Ток I_2 в катушке K_2 отстает от напряжения U по фазе на угол 90° , так как цепь второй подвижной катушки имеет индуктивный характер.

Подвижные катушки K_1 и K_2 соединены внутри прибора так, что при включении фазометра в цепь на них действуют силы F_1 и F_2 , стремящиеся повернуть катушки в противоположные стороны (рис.27.а). Значения этих сил можно определить с помощью векторной диаграммы (рис.27.в):

$$F_1 = k \cdot I_1 \cdot \Phi \cdot \cos(I_1 \wedge \Phi) = k \cdot I_1 \cdot \Phi \cdot \cos \varphi;$$

$$F_2 = k \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \cos(I_2 \wedge \Phi) = k \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \cos(90^\circ - \varphi) = k \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \sin \varphi.$$

Из рис.27.а следует, что вращающие моменты, действующие на катушки K_1 и K_2 , равны соответственно:

$$M_1 = F_1 \cdot \ell \cdot \cos(90^\circ - \alpha) = F_1 \cdot \ell \cdot \sin \alpha;$$

$$M_2 = F_2 \cdot \ell \cdot \cos \alpha.$$

Подстановка выражений, определяющих силы F_1 и F_2 в полученные уравнения, позволяет найти вращающие моменты:

$$M_1 = k \cdot I_1 \cdot \Phi \cdot \ell \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha;$$

$$M_2 = k \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \ell \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha.$$

Под действием противоположно направленных вращающих моментов подвижный механизм будет поворачиваться в сторону большего вращающего момента до тех пор, пока не наступит равновесие ($M_1 = M_2$):

$$k \cdot I_1 \cdot \Phi \cdot \ell \cdot \cos \varphi \cdot \sin \alpha = k \cdot I_2 \cdot \Phi \cdot \ell \cdot \sin \varphi \cdot \cos \alpha;$$

следовательно:

$$\sin \alpha / \cos \alpha = I_2 \cdot \sin \varphi / I_1 \cdot \cos \varphi.$$

Если параметры цепей подвижных катушек фазометра подобрать так, чтобы выполнялось условие $R = x_L$, то $I_1 = I_2$, следовательно, $\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi$, то есть $\alpha = \varphi$ – угол поворота подвижного механизма фазометра равен углу сдвига фаз между током и напряжением нагрузки.

Полученный вывод имеет следующее физическое объяснение. Если отключить цепь катушки K_2 то фазометр превратится в ваттметр активной мощности, так как последовательно с катушкой K_1 включено большое активное сопротивление R . Если же отключить цепь катушки K_1 , то фазометр превратится в ваттметр реактивной мощности, поскольку последовательно с катушкой K_1 включено большое индуктивное сопротивление x_L . Таким образом, фазометр представляет собой прибор, в котором объединены два ваттметра (активной и реактивной мощности), имеющие общий подвижный механизм.

При включении фазометра в цепь активной нагрузки вращающий момент, действующий на катушку K_2 , равен нулю, так как реактивная мощность равна нулю, а вращающий момент, действующий на катушку K_1 , максимален. Катушка K_1 повернется так, что ее плоскость совпадет с плоскостью неподвижной катушки,

а стрелка установится против крайнего деления шкалы, соответствующего значению $\varphi=0$.

В случае индуктивной нагрузки вращающий момент, действующий на катушку K_1 , равен нулю, поскольку активная мощность равна нулю. При этом на катушку K_2 действует максимальный вращающий момент и эта катушка повернется так, что ее плоскость совпадет с плоскостью неподвижной катушки, а стрелка установится против крайнего деления шкалы, соответствующего значению $\varphi=90^\circ$.

Если активная и реактивная мощности, потребляемые нагрузкой, равны, то подвижный механизм займет среднее положение относительно неподвижной катушки и стрелка прибора установится против деления шкалы 45° .

Из равенства $\alpha=\varphi$ следует, что если шкалу фазометра проградуировать в значениях угла φ , то шкала такого прибора будет равномерной. Однако практический интерес представляет измерение не угла φ , а коэффициента мощности $\cos \varphi$. Градуировка шкалы в значениях коэффициента мощности делает ее сильно неравномерной. Для уменьшения неравномерности шкалы необходимо катушки K_1 и K_2 расположить под углом 60° друг относительно друга или сопротивления R и x_L подобрать так, чтобы токи I_1 и I_2 не были равны. Например, если значения R и x_L подобрать так, чтобы выполнялось равенство $I_1=\sqrt{3}\cdot I_2$, то углы α и φ будут связаны соотношением $\operatorname{tg}\alpha=\operatorname{tg}\varphi/\sqrt{3}$ и шкала будет более равномерной.

Из соотношения $\alpha=\varphi$ следует, что при перемене знака угла α изменяется характер нагрузки. Таким образом, если нулевое деление шкалы (или $\cos\varphi=1$) расположить в ее середине, то по направлению отклонения стрелки можно судить о характере нагрузки.

Электродинамические фазометры выпускают в виде переносных приборов с диапазоном измерений угла φ , равным $0\dots 90^\circ$ или $0\dots 360^\circ$, а $\cos\varphi$, равным $0\dots 1$ классов точности $0,2$ и $0,5$. Предназначены они, в основном, для работы в цепях промышленной частоты.

5. ПРИБОРЫ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

Однофазный индукционный счетчик электрической энергии

Принцип действия приборов индукционной системы основан на взаимодействии переменного магнитного потока с индукционным током. Индукционные приборы пригодны лишь для измерений в цепях переменного тока, так как ток может лишь индуцироваться 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 переменный индукционный ток, взаимодействующий с этим потоком. Однако результирующая сила, действующая на диск, равна нулю. Поэтому для создания вращающего момента необходимо использовать два магнитных потока, сдвинутых друг относительно друга по фазе на некоторый угол (например, $\pi/2$). При этом возникает взаимодействие потоков с «чужими», а не со «своими» индукционными токами.

Индукционная катушка имеет две катушки с сердечниками: токовую и катушку напряжения.

Токовую катушку (рис.28.а) навивают толстым проводом на стальной сердечник и включают последовательно с нагрузкой. Магнитный поток Φ_i в ней пропорционален току нагрузки.

Катушку напряжения (рис.28.б) обычно навивают большим числом витков тонкого провода на стальной сердечник. Индуктивное сопротивление x_L этого электромагнита несопоставимо больше активного сопротивления R ($x_L \gg R$), поэтому эту цепь можно считать индуктивной, следовательно, ток i_u в катушке напряжения отстает по фазе на $\pi/2$.

Край алюминиевого диска одновременно пронизывается двумя магнитными потоками: дважды – потоком Φ_i токовой катушки и один раз – потоком Φ_u катушки напряжения (рис.28.в). Эти магнитные потоки индуцируют в диске токи $i_{\partial i}$ и $I_{\partial u}$ соответственно, причем ток $I_{\partial u}$ взаимодействует с магнитным потоком Φ_i (рис.28.г), а ток $I_{\partial i}$ – с магнитным потоком Φ_u (рис.28.д). Направление индукционных токов $I_{\partial u}$ и $I_{\partial i}$ зависит от того, возрастает или убывает создающий его магнитный поток. Это необходимо учесть при определении направления действующих на диск сил F_1 и F_2 . Учитывая характер изменения токов $I_{\partial i}$ и $I_{\partial u}$ (рис.28.е), используя правило Ленца и применяя правило левой руки, можно установить, что силы F_1 и F_2 , создающие вращающий момент, направлены одинаково – от опережающего тока к отстающему. Значения этих сил можно найти с помощью закона Ампера:

$$F = B \cdot \ell \cdot I \cdot \sin \alpha,$$

где $B = \Phi/S$; $\sin \alpha = 1$; B и I – переменные величины. Тогда мгновенное значение силы f равно:

$$f = c \cdot i \cdot \Phi,$$

где $c = \ell/S$. Силы f_1 и f_2 можно выразить следующими соотношениями:

$$f_1 = c_1 \cdot i_{\partial u} \cdot \Phi_i; \quad f_2 = c_2 \cdot i_{\partial i} \cdot \Phi_u.$$

Для анализа работы измерительного механизма необходимо построить векторную диаграмму, где за основной следует принять вектор приложенного напряжения U (рис.28.ж). В случае индуктивной нагрузки ток I отстает по фазе от напряжения на некоторый угол φ . Этот ток создает в электромагните магнитный поток Φ_i , совпадающий с ним по фазе. Магнитный поток Φ_i ин-

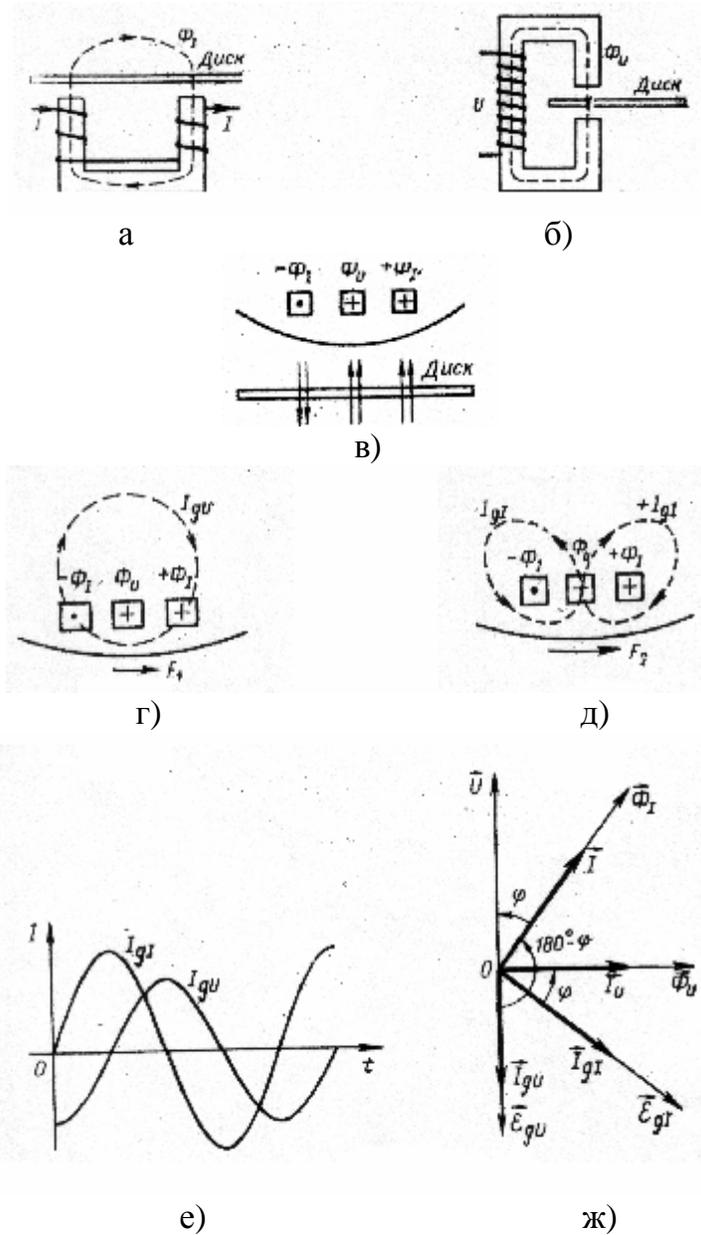


Рис.28

дуцирует в диске ЭДС ε_{di} , которая отстает по фазе от магнитного потока на $\pi/2$. Под действием этой ЭДС в диске возникает индукционный ток I_{di} . Если сопротивление материала диска считать активным, то ток I_{di} и ЭДС ε_{di} совпадут по фазе.

Катушку напряжения, имеющую большое число витков и стальной почти замкнутый сердечник, можно рассматривать как индуктивную нагрузку. Поэтому ток I_u в этой катушке отстает по фазе от напряжения на угол $\pi/2$. Магнитный поток Φ_u наводит в диске ЭДС индукции ε_{du} , отстающую от него по

фазе на угол $\pi/2$. Под действием ЭДС ε_{du} в диске возникает индукционный ток I_{du} , совпадающий по фазе с ЭДС ε_{du} .

На основании векторной диаграммы можно записать:

$$i_{du} = I_{du\max} \cdot \sin(\omega t - \pi) = -I_{du\max} \cdot \sin \omega t;$$

$$\Phi_i = \Phi_{i\max} \cdot \sin(\omega t - \varphi);$$

$$i_{di} = I_{di\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2 - \varphi);$$

$$\Phi_u = \Phi_{u\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2),$$

тогда:

$$f_1 = -c_1 \cdot I_{du\max} \cdot \sin \omega t \cdot \Phi_{i\max} \cdot \sin(\omega t - \varphi);$$

$$F_1 = (1/T) \cdot \int_0^T f_1 \cdot dt = c_1' \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi;$$

$$F_2 = c_2 \cdot I_{di\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2 - \varphi) \cdot \Phi_{u\max} \cdot \sin(\omega t - \pi/2);$$

$$F_2 = (1/T) \cdot \int_0^T f_2 \cdot dt = c_2' \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi.$$

Значение результирующей силы, приложенной к диску, равно:

$$F = F_1 + F_2 = (c_1' + c_2') \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi,$$

а вращающего момента, действующего на диск, равно:

$$M_{вр} = F \cdot d = c' \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi = c' \cdot P,$$

где $c' = (c_1' + c_2') \cdot d$. Под действием вращающего момента диск вращался бы ускоренно, и число оборотов не соответствовало бы израсходованной электрической энергии, поэтому необходимо наличие противодействующего момента.

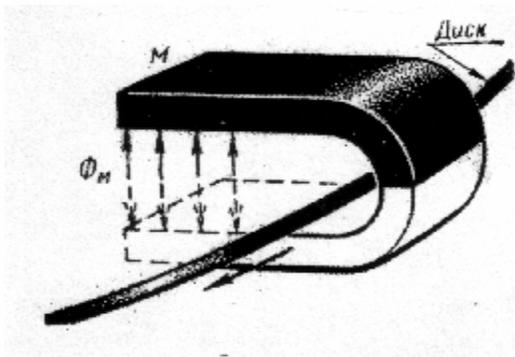


Рис.29

Противодействующий момент в индукционном счетчике создается действием поля постоянного магнита и электромагнитов на движущийся край диска (рис.29):

$M_{пр} = c'' \cdot v = c'' \cdot 2 \cdot \pi \cdot R \cdot n = c''' \cdot n,$

где c'' – постоянный коэффициент, учитывающий толщину, материал диска и индукцию поля постоянного

магнита; v – значение линейной скорости движения диска; R – радиус диска; c''' – коэффициент, постоянный для данного прибора.

Движение диска станет равномерным, когда вращающий и противодействующий моменты окажутся равны друг другу:

$$c' \cdot n = c''' \cdot P.$$

Умножая на промежуток времени t обе части последнего равенства, можно преобразовать его к виду:

$$c''' \cdot n \cdot t = c' \cdot P \cdot t,$$

где $n \cdot t = N$ – число оборотов диска за время t , $P \cdot t$ – количество электрической энергии, прошедшей через счетчик за то же время, можно определить энергию W , израсходованную нагрузкой за время t :

$$N = (c/c'') \cdot P \cdot t = c \cdot W,$$

где c – постоянная счетчика.

Таким образом, число оборотов N диска индукционного прибора пропорционально израсходованной электрической энергии. Такой прибор называют индукционным счетчиком электрической энергии.

Схематическое устройство индукционного однофазного счетчика приведено на рис.30. Легкий алюминиевый диск D укреплен на вертикальной оси. На некотором расстоянии от центра диска расположены два неподвижных электромагнита: M_i и M_u . Электромагнит M_i имеет вид опрокинутой буквы Π . По его обмотке проходит весь ток нагрузки. Магнитный поток Φ_i этого электромагнита дважды пронизывает диск в противоположных направлениях, замыкаясь через воздух.

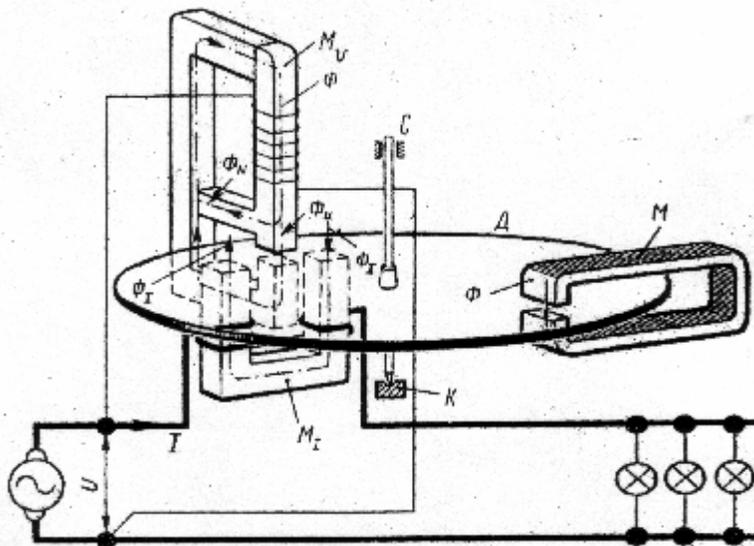


Рис.30

Электромагнит M_u имеет вид перевернутой буквы B . 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, пропорциональный скорости вращения диска, создается электромагнитами и постоянным магнитом M . Наведенный полем этого магнита, индукционный ток в диске, взаимодействуя с создавшим его потоком, препятствует, в соответствии с правилом Ленца, этому вращению, в результате чего создается противодействующий момент.

Для характеристики счетчика введены следующие параметры:

1. Действительная постоянная счетчика $C=W/N=P \cdot t/N$ представляет собой значение электрической энергии в ватт-секундах, действительно израсходованной за время одного оборота диска; C зависит от нагрузки; определяют ее по показаниям контрольных приборов при разных нагрузках.

2. Номинальная постоянная счетчика C_n – это количество электроэнергии, которое учитывает счетный механизм за время одного оборота диска. Практически часто используют величину, обратную постоянной счетчика: $A_n = 1/C_n = N/I$ *кВт·ч*, называемую передаточным числом счетчика. Передаточное число – число оборотов диска, соответствующее израсходованной энергии, равной 1 *кВт·ч*.

3. Относительная погрешность счетчика $\Delta = [(W_1 - W_2)/W_2] \cdot 100\%$, где W_1 – учтенная счетчиком энергия; W_2 – действительно израсходованная энергия, рассчитанная по показаниям точных приборов. Поскольку $W_1 = C_n N$ и $W_2 = CN$, то $\Delta = [(C_n - C)/C] \cdot 100\%$.

4. Поправочный коэффициент $k = W_1/W_2 = C/C_n$ – число, на которое надо умножать показания счетчика, чтобы получить значение действительно израсходованной энергии.

5. Чувствительность счетчика $\sigma = [I_{min}/I_n] \cdot 100\% = [P_{min}/P_n] \cdot 100\%$ – наименьший ток или мощность, выраженные в процентах от номинального, при которых счетчик работает безостановочно при номинальном напряжении.

6. Самоход счетчика – вращение диска более 1 оборота при отключенной нагрузке.

Счетчики электрической энергии должны удовлетворять следующим требованиям:

1) счетчик не должен иметь самохода при напряжении, составляющем 90%...110% номинального;

2) погрешность счетчика не должна превышать его класс точности при нагрузках 25%, 50%, 75% и 100% номинальной;

3) счетчик класса точности 2,5 должен иметь чувствительность не более 2,5%.

Для регулировки подвижной системы счетчика применяют следующие меры:

а) для регулировки магнитного потока, обусловленного обмоткой напряжения, изменяют положение магнитного потока этого электромагнита;

б) для регулировки магнитного потока, обусловленного токовой катушкой, на нее навивают несколько витков, замкнутых на проволоку с большим удельным сопротивлением в виде петли, и надевают несколько тонких короткозамкнутых алюминиевых колец (индукционный ток в короткозамкнутых обмотках и витках размагничивает электромагнит). Для грубой регулировки потока разрезают кольца, после чего регулировку осуществляют плавным изменением длины проволочной петли;

в) для регулировки скорости вращения диска изменяют расстояние между постоянным магнитом и осью вращения, что приводит к изменению значения противодействующего момента.

6. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Принцип действия электростатических приборов основан на взаимодействии электрически заряженных электродов, разделенных диэлектриком. Конструктивно механизмы таких приборов представляют собой воздушный конденсатор с изменяющейся емкостью. Практическое применение нашли приборы с поверхностным механизмом, в которых изменение емкости осуществляется за счет изменения активной площади электродов, и с линейным механизмом, где

изменение емкости осуществляется вследствие изменения расстояния между электродами.

Прибор с поверхностным измерительным механизмом состоит из подвижных электродов 1 и неподвижных электродов 2, закрепленных на оси (рис.31). Электроды выполняют из алюминия. Измеряемое напряжение U , приложенное к неподвижному и подвижному электродам, создает между ними электростатическое поле. В результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, подвижные пластины будут стремиться втянуться в пространство между неподвижными. Вращающий момент:

$$M_{\text{сп}} = dW_{\text{э}} / d\alpha = d(C \cdot u^2 / 2) / d\alpha = (1/2) \cdot (dC/d\alpha) \cdot u^2,$$

где $W_{\text{э}}$ – энергия электростатического поля

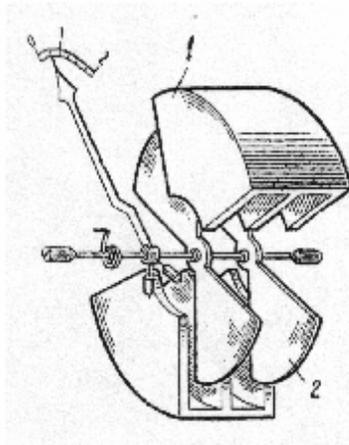


Рис.31

сис-

темы заряженных пластин; C – электрическая емкость между подвижными и неподвижными пластинами; u – напряжение между подвижными и неподвижными пластинами.

Если напряжение U постоянное, то вращающий момент равен:

$$M_{\text{сп}} = (1/2) \cdot (dC/d\alpha) \cdot U^2.$$

Если $u = U_m \cdot \sin \omega t$, то мгновенный вращающий момент равен:

$$M_{ep} = (1/4) \cdot (dC/da) \cdot U_m^2 \cdot (1 - \cos 2\omega t).$$

Таким образом, вращающий момент имеет постоянную и гармоническую составляющие. Отклонение подвижной части обычно применяемого электростатического измерительного механизма под действием переменного напряжения промышленной и более высокой частоты определяется постоянной составляющей момента, которая может быть записана в следующем виде:

$$M = (1/T) \cdot \int_0^T M_{ep} \cdot dt = (1/2) \cdot (dC/da) \cdot (1/T) \cdot \int_0^T U_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot dt = (1/2) \cdot (dC/da) \cdot U^2,$$

где U – действующее значение напряжения.

При искаженной форме напряжения $u = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_{mk} \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k)$ вращающий момент равен:

$$M = (1/2) \cdot (dC/da) \cdot (U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \dots) = (1/2) \cdot (dC/da) \cdot U^2,$$

где U^2 – квадрат искаженного по форме действующего напряжения; U_0, U_1, U_2, \dots – постоянная и гармонические составляющие приложенного напряжения.

Если противодействующий момент создается упругими элементами, то угол поворота подвижной части равен:

$$\alpha = (1/2W) \cdot (dC/da) \cdot U^2.$$

Из полученного выражения следует, что зависимость угла отклонения подвижной части от напряжения нелинейна и что поворот подвижной части одинаков при постоянном напряжении и при переменном напряжении, действующее значение которого равно значению постоянного напряжения. Для уменьшения нелинейности зависимости угла отклонения α от напряжения подвижным пластинам придают специальную форму, при которой величина dC/da является требуемой функцией α .

Электростатические измерительные механизмы имеют следующие преимущества: 1) малое собственное потребление мощности от измеряемой цепи, причем при измерении постоянного напряжения потребление мощности равно нулю; 2) на показания электростатических механизмов незначительное влияние оказывают температура окружающей среды, частота и форма измеряемого напряжения, магнитные поля не оказывают влияния на показания этих приборов; 3) возможность измерения высоких напряжений, достигающих сотен киловольт без применения громоздких, дорогих и потребляющих большую мощность добавочных [резисторов и измерительных трансформаторов. Однако электростатические измерительные механизмы имеют малую чувствительность и на их показания большое влияние оказывают внешние электростатические поля.

Электростатические измерительные механизмы применяют, главным образом, для измерения напряжения постоянного и переменного тока. Находят применение также электрометры – электростатические приборы специальной конструкции, обладающие повышенной чувствительностью к напряжению.

В электростатических вольтметрах измеряемое напряжение подается непосредственно на измерительный механизм. Конструкция вольтметра зависит от предела его измерений. Вольтметрам, предназначенным для измерения малых и средних напряжений, характерен очень малый воздушный зазор между пластинами, что вызывает опасность короткого замыкания пластин, а следовательно, и источника измеряемого напряжения. Для исключения короткого замыкания в прибор встраивают защитный резистор, через который вольтметр подключается к исследуемой цепи. При измерениях напряжений повышенной частоты, составляющей сотни кГц, защитный резистор во избежание дополнительной погрешности отключают.

Расширение пределов измерений электростатических вольтметров при измерении переменного напряжения осуществляется включением последовательно с вольтметром, имеющим собственную емкость $C_в$, добавочного конденсатора $C_д$ или использованием емкостного делителя, состоящего из конденсаторов C_1 и C_2 . В первом случае напряжение на вольтметре определяется выражением: $U_в = U \cdot C_д / (C_в + C_д)$. Зависимость емкости $C_в$ от угла поворота подвижного механизма приводит к дополнительной погрешности измерений. При использовании емкостного делителя $U_в = U \cdot C_1 / (C_1 + C_2 + C_в)$, где C_2 - емкость конденсатора, параллельно которому подключен вольтметр. Если $C_2 \gg C_в$, то коэффициент пропорциональности окажется практически постоянным для всего диапазона измерений.

Расширение пределов измерения электростатических вольтметров постоянного тока осуществляют с помощью делителей напряжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тартаковский Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений /Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребов. – М: Высш. шк., 2002. - 208 с.
2. Основы метрологических измерений / Б.Я. Авдеев [и др.]; под ред. Е.М. Душина. – Л: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
3. Алиев Т.М. Измерительная техника /Т.М. Алиев, А.А. Тер-Хачатуров. – М: Высш. шк., 1991. – 384 с.
4. Метрология, стандартизация и измерения в технике связи /Б.П. Хромой [и др.]; под ред. Б.П. Хромого. – М: Радио и связь, 1986. – 476 с.
5. Кравцов А.В. Электрические измерения. /А.В. Кравцов. – М: Агропромиздат, 1988. – 240 с.

СОДЕРЖАНИЕ

1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ	
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ	
1.1. Классификация электроизмерительных приборов	3
1.2. Устройство для создания противодействующего момента	7
1.3. Шкалы приборов	9
1.4. Успокоители	10
2. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ	
2.1. Магнитоэлектрический измерительный механизм	11
2.2. Магнитоэлектрические амперметры	14
2.3. Магнитоэлектрические вольтметры	15
2.4. Магнитоэлектрические омметры	16
2.5. Логометры	18
2.6. Гальванометры	19
2.7. Выпрямительные приборы	21
3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ	
3.1. Электромагнитный измерительный механизм	22
3.2. Электромагнитные амперметры	24
3.3. Электромагнитные вольтметры	25
3.4. Электромагнитные логометры	26
4. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ	
4.1. Электромагнитный измерительный механизм	27
4.2. Электродинамические амперметры и вольтметры	28
4.3. Астатические измерительные механизмы	29
4.4. Ферродинамические приборы	31
4.5. Электродинамические логометры	32
4.6. Электродинамические ваттметры	33
4.7. Однофазный фазометр	36
5. ПРИБОРЫ ИНДУКЦИОННОЙ СИСТЕМЫ	
Однофазный индукционный счетчик электрической энергии	38
6. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ	44
ЛИТЕРАТУРА	46

Ларионов Алексей Николаевич
 Чернышев Вадим Викторович
 Ларионова Нина Николаевна

Редактор Тихомирова О.А.