

График зависимости (13.5) при $\beta < 1$ приведен рис.13.5.

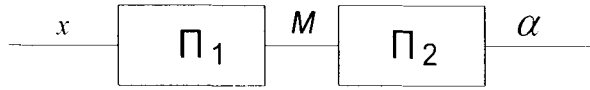


Рис.13.4. Структурная схема измерительного механизма

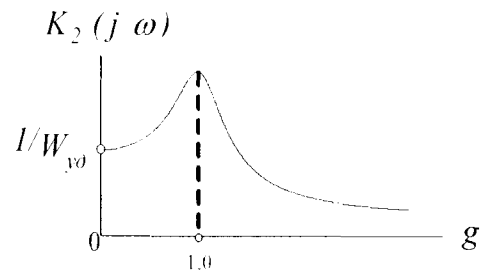


Рис.13.5. График АЧХ второго звена измерительного механизма

Как видно из графика, коэффициент передачи (АЧХ) второго звена зависит от частоты изменения вращающего момента. Для магнитоэлектрических измерительных механизмов частота вращающего момента равна частоте входной электрической величины. Для остальных измерительных механизмов вращающий момент имеет постоянную и переменную составляющие, частота переменной в два раза выше частоты входной величины.

ЛЕКЦИЯ 14. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Электромеханические приборы – достаточно сложные устройства. Они состоят из большого числа деталей и функциональных узлов. Общими функциональными узлами являются:

- электроизмерительная цепь,
- измерительный механизм,
- отсчетное устройство.

Измерительная цепь служит для преобразования измеряемой величины A в электрическую, непосредственно воздействующую на измеритель-

ный механизм. *Измерительный механизм* преобразует электрическую величину в угол поворота подвижной части. *Отсчетное устройство* служит для визуального отсчитывания значений измеряемой величины. Оно состоит из шкалы и указателя. Шкала представляет пластину с отметками в значениях измеряемой величины. Указатель – это стрелка или световой луч, жестко связанные с подвижной частью измерительного механизма.

Все электромеханические приборы имеют корпус, крепление подвижной части механизма, успокоитель, корректор, арретир.

Корпус прибора предназначен для защиты измерительного механизма от ряда внешних воздействий.

Крепление подвижной части – это опоры, растяжки или подвес.

Успокоитель исключает колебания указателя относительно положения равновесия. Применяют магнитоиндукционные, жидкостные и воздушные успокоители.

Корректор обеспечивает установку указателя на нулевую отметку шкалы. Представляет собой винт, укрепленный в корпусе прибора.

Арретир – это устройство, затормаживающее подвижную часть прибора.

На каждый прибор наносят условные обозначения: единицу измеряемой величины, класс точности, род тока, условное обозначение типа измерительного механизма, рабочее положение прибора, если это имеет значение.

2. МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Магнитоэлектрические приборы применяют для измерения постоянных токов и напряжений (амперметры и вольтметры), сопротивлений (омметры), количества электричества (баллистические гальванометры, кулонметры), малых токов и напряжений (гальванометры), а также для регистра-

венных колебаний подвижной части $\omega_0 = 6,28 \text{ с}^{-1}$. Поэтому при частоте тока 10 Гц подвижная часть механизма колеблется с частотой входного тока. С увеличением частоты увеличивается момент сил инерции. Амплитуда отклонений подвижной части уменьшается, а затем становится равной нулю. Значит, такие приборы можно применять только в цепях постоянного тока.

Учтем противодействующий момент. При некотором угле поворота подвижной части механизма – α наступает равенство моментов:

$$M = -M_{\text{ин}} = W_{\text{yo}} \cdot \alpha$$

Подставляя в это выражение (14.1), легко получить:

$$\alpha = B \cdot S_p \cdot \varpi \cdot I / W_{\text{yo}}. \quad (14.2)$$

Из (14.2) следует, что если $B = \text{const}$, то угол α пропорционален току I , а шкала магнитоэлектрического измерительного прибора равномерная.

Для логометрических измерительных механизмов подвижную часть изготавливают в виде двух жестко скрепленных рамок. Чтобы обеспечить линейность шкалы, зазор между неподвижным сердечником и постоянным магнитом выполняют неравномерным, добиваясь $\alpha = F(I_1 / I_2)$, где I_1, I_2 – токи рамок.

Успокоитель подвижной части механизма – магнитоиндукционный. Успокоение достигается за счет взаимодействия токов, наводимых в дюралюминиевом каркасе подвижной рамки с полем постоянного магнита.

Достоинства магнитоэлектрических измерительных механизмов: высокая чувствительность, линейная шкала, малое потребление энергии, отсутствие влияния внешних электрических и магнитных полей.

Недостаток: возможность применения только в цепях постоянного тока.

Магнитоэлектрические амперметры позволяют выполнять измерения как малых токов – от 10^{-7} А так и достаточно больших – до 10^3 А . При изменении малых токов – до 30 мА , измерительный механизм амперметра вклю-

ции электрических величин.

Вращающий момент в измерительном механизме возникает в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля рамки с током (рис. 14.1). На рисунке N, S - полюса магнита, 1 – неподвижный сердечник, 2 – спиральная пружина, 3 – подвижная рамка с закрепленным на ней указателем. Рамка представляет собой дюралюминиевый каркас, на который наматывается намагничивающая катушка из медного провода. Ток к подвижной рамке (катушке) подводится через две спиральные пружины. При протекании тока I через витки катушки, возникает вращающий момент по (13.1). Известно, что

$$W_{\text{эм}} = \psi \cdot I,$$

где $\psi = B \cdot \varpi \cdot S_p \cdot \alpha$ - потокосцепление, B – магнитная индукция в воздушном зазоре измерительного механизма, S_p - площадь подвижной рамки.

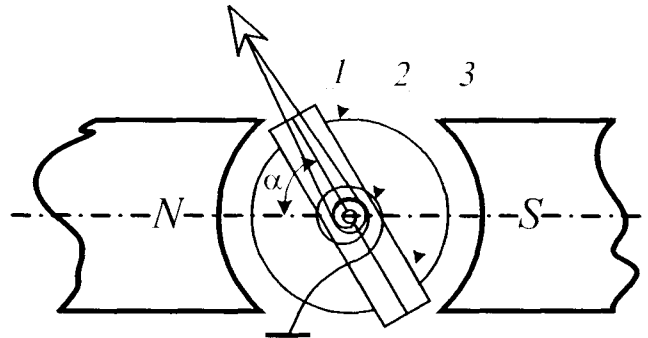


Рис. 14.1. Упрощенная схема магнитоэлектрического измерительного механизма

Подставляя приведенные значения для $W_{\text{эм}}$ и ψ в (13.1), получим:

$$M = dW_{\text{эм}} / d\alpha = B \cdot S_p \cdot \varpi \cdot I. \quad (14.1)$$

Если ток, протекающий через рамку, синусоидальный – $i(t) = I_m \sin \omega t$, то и вращающий момент становится синусоидальным:

$$M = B \cdot S_p \cdot \varpi \cdot I_m \cdot \sin \omega t.$$

При этом в соответствии с (13.5), работа измерительного механизма зависит от значения q . У магнитоэлектрических механизмов частота собст-

чается в разрыв цепи непосредственно. Для измерения больших токов применяют шунты. В многопредельных амперметрах применяют многопредельные шунты. Необходимо учитывать, что применение шунтов сопровождается появлением дополнительных погрешностей. В частности, возникает температурная погрешность.

Магнитоэлектрические вольтметры позволяют выполнять измерения в диапазоне от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $3 \cdot 10^3$ В. Для расширения диапазона измерений, последовательно с измерительным механизмом включают добавочный резистор, или несколько резисторов. Класс точности добавочных резисторов должен быть не ниже $0,1 \div 0,5$.

На основе магнитоэлектрического измерительного механизма выпускают омметры. Широко распространены две схемы включения измерительного механизма и измеряемого сопротивления – последовательная и параллельная (рис. 14.2).

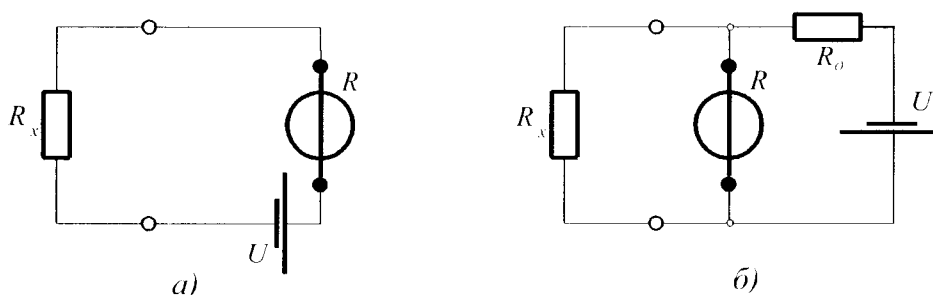


Рис. 14.2. Схемы омметров с последовательным (а) и параллельным (б) включением измерительного механизма

Все омметры имеют неравномерную шкалу, т.к.

$$\alpha_{\text{послед}} = S \cdot U / (R + R_x),$$

$$\alpha_{\text{пар}} = S \cdot U \cdot R_x / [(R R_x + R_0 (R + R_x))],$$

где $S = B \cdot S_p \cdot \varpi / W_{\text{во}}$ – чувствительность магнитоэлектрического измерительного механизма.

Последовательное включение измерительного механизма применяют

для измерения больших сопротивлений, а параллельное – для измерения малых. Диапазоны измерений омметров имеют пределы от 10 Ом до 1000 МОм . Класс точности $1 \div 1,5$.

3. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ И ФЕРРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

Эти приборы применяют для измерения постоянных и переменных токов и напряжений, мощности в цепях постоянного и переменного тока, частоты и угла фазового сдвига.

Работа электродинамического измерительного механизма (рис. 14.3) основана на взаимодействии магнитных полей двух катушек с токами: неподвижной – 1 и подвижной – 2. Подвижная катушка на оси или растяжках может поворачиваться внутри неподвижной. Обе катушки бескаркасные. Для защиты от влияния внешних магнитных полей применяется экранирование из ферромагнитного материала.

При протекании в обмотках катушек токов I_1 и I_2 возникают электромагнитные силы, стремящиеся так повернуть подвижную часть механизма, чтобы магнитные потоки катушек совпадали. Энергия магнитного поля двух катушек определяется выражением:

$$W_M = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{12} I_1 I_2, \quad (14.3)$$

где L_1, L_2 – индуктивности катушек, M_{12} – взаимная индуктивность катушек.

В (14.3) только взаимная индуктивность M_{12} зависит от угла поворота подвижной части измерительного механизма. Поэтому на основании (13.1) получаем:

$$M = \frac{dW_M}{d\alpha} = I_1 \cdot I_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (14.4)$$

Если токи I_1 и I_2 переменные, т.е. $i_1(t) = I_{m_1} \cdot \sin \omega t$, $i_2(t) = I_{m_2} \cdot \sin(\omega t - \psi)$, то измерительный механизм реагирует на среднее значение вращающего момента

$$M_{cp} = \frac{1}{T} \cdot \int M(t) \cdot dt = \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cdot \frac{1}{T_0} \cdot \int_0^T I_{m_1} \cdot I_{m_2} \cdot \sin \omega \cdot t \cdot \sin(\omega \cdot t - \psi) \cdot dt = I_1 \cdot I_2 \cdot \cos(\psi) \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha}, \quad (14.5)$$

где I_1, I_2 – действующие значения токов, ψ – угол сдвига фаз между токами в катушках.

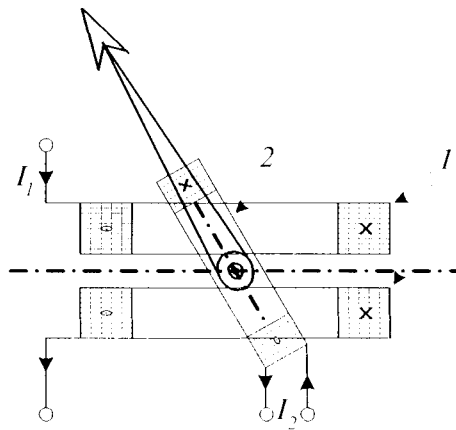


Рис. 14.3. Схема электродинамического измерительного механизма

Если противодействующий момент создается упругими элементами, то $M = -M_{np}$ и можно записать:

$$I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} = W_{yo} \cdot \alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{1}{W_{yo}} I_1 \cdot I_2 \cdot \cos \psi \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (14.6)$$

Для постоянных токов

$$\alpha = \frac{1}{W_{\text{yo}}} I_1 \cdot I_2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (14.7)$$

Таким образом, электродинамические механизмы дают одинаковые показания на постоянном и переменном токе. Это позволяет с большой точностью градуировать шкалу на постоянном токе. Показания стабильны во времени.

Недостатки электродинамических механизмов: низкая (по сравнению с магнитоэлектрическими измерительными механизмами) чувствительность, большое потребление мощности, чувствительность к перегрузкам и к воздействию внешних магнитных полей.

Механизмы ферродинамической системы отличаются от электродинамических тем, что неподвижная катушка имеет магнитопровод из магнитомягкого материала. В результате магнитный поток, а значит, и вращающий момент, существенно возрастают. Это позволяет уменьшить МДС ($F = \omega \cdot I$) и потребляемую мощность. Сильное собственное магнитное поле механизма ферродинамической системы ослабляет влияние внешних магнитных полей.

Наличие ферромагнитного магнитопровода порождает дополнительные недостатки – гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе вызывают появление дополнительных погрешностей. Общие выражения для вращающего момента и угла поворота ферродинамических измерительных механизмов с точностью до постоянной составляющей совпадают с (14.5), (14.6).

В электродинамических и ферродинамических амперметрах для токов до $0,5 \text{ A}$ катушки измерительного механизма соединяются последовательно. Поэтому $I_1 = I_2$, $\cos\psi = 1$, а

$$\alpha = \frac{1}{W_{\text{yo}}} \cdot I^2 \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha}. \quad (14.8)$$

Для получения линейной зависимости $\alpha = f(I)$, а значит, и равномерной шкалы измерительного прибора неподвижную катушку располагают

так, чтобы функция (14.8) корректировалась к линейной. Практически шкала линейна в пределах (25-100)% её длины.

Для измерения больших токов катушки механизма включают параллельно.

Электродинамический вольтметр состоит из измерительного механизма и добавочного резистора, причем катушки механизма и резистор включены последовательно. Поэтому

$$\alpha = \frac{1}{W_{yo} \cdot Z} \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cdot U^2,$$

где Z – полное сопротивление цепи вольтметра.

Для расширения пределов измерений добавочный резистор может быть многосекционным.

Электродинамические измерительные приборы применяют для точных измерений в цепях переменного тока на частотах от 40 Гц до 10 кГц, а также в качестве образцовых, при поверке и градуировке других приборов. Классы точности $0,1 \div 0,5$. Класс точности ферродинамических приборов $1,5$ и $2,5$. Диапазон частот $40 \div 550$ Гц.

3.1. Электродинамические ваттметры.

Для измерения мощности неподвижные катушки электродинамического (ферродинамического) механизма включают последовательно с объектом, потребляемая мощность которого измеряется. Подвижная катушка с добавочным резистором R_o включается параллельно объекту (рис. 14.4). На основании (14.5) для ваттметра, работающего в цепи постоянного тока, легко получить выражение для угла поворота:

$$\alpha = \frac{1}{W_{yo}} \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cdot \frac{U \cdot I}{R_l + R_o} = S \cdot P, \quad (14.9)$$

где R_U – сопротивление подвижной (токовой) катушки,

$$S = \frac{1}{W_{\text{во}}} \cdot \frac{dM_{12}}{d\alpha} \cdot \frac{1}{R_L + R_o} - \text{чувствительность механизма.}$$

Для цепи переменного тока выражение (14.9) принимает вид:

$$\alpha = S \cdot U \cdot I \cdot \cos(\varphi - \psi) \cdot \cos\psi, \quad (14.10)$$

где φ - сдвиг фаз между током и напряжением, определяемый характером нагрузки.

Выражения (14.9) и (14.10) показывают, что отклонение подвижной катушки пропорционально активной мощности. В цепях переменного тока возникает погрешность за счет сдвига фаз между токами катушек - ψ . Для компенсации этой погрешности в цепь катушки можно включать конденсатор C (см. рис. 14.4). Однако, такой способ эффективен только для частоты, значение которой определяется реактивным сопротивлением конденсатора.

В общем случае, при $\psi \neq 0$ ваттметр измеряет мощность с погрешностью δ_ψ , называемую угловой погрешностью. Обычно сдвиг фаз между токами катушек мал и составляет $(40 \div 50)'$. При таком значении угла $\sin\psi = \psi$, а $\cos\psi \approx 1$ и относительная угловая погрешность δ_ψ определяется выражением

$$\delta_\psi = (\psi \cdot \operatorname{tg}\varphi) \cdot 100.$$

Видим, что когда φ близко к 90° , угловая погрешность может достигать больших значений.

Погрешность измерения возникает и за счет мощности, потребляемой параллельной и последовательной цепями ваттметра. Возможны две схемы включения параллельной цепи ваттметра (рис. 14.5).

Будем полагать, что $\psi = 0$, а $Z = R$. Тогда погрешность, обусловленная потреблением мощности катушками ваттметра, для схемы рис. 14.5, а определится выражением

$$\delta = (UI_H - U_H I_H) / U_H I_H = P_I - P_H,$$

а для схемы рис. 14.5, б выражением

$$\delta = [U_H \cdot (I_U + I_H) - U_H I_H] / U_H I_H = P_U - P_H,$$

где P_I, P_U - мощность, потребляемая последовательной и параллельной цепями ваттметра соответственно.

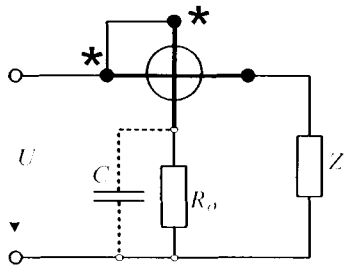
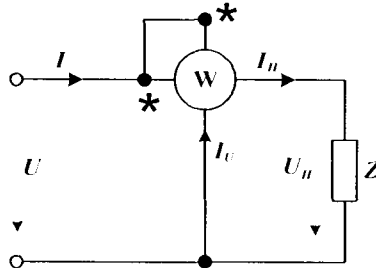
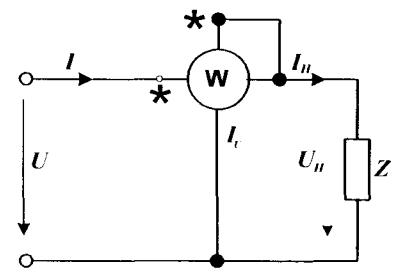


Рис. 14.4. Схема включения ваттметра с компенсацией угловой погрешности



а)



б)

Рис.14.5. Схемы включения параллельной цепи ваттметра: (а) - до последовательной цепи, (б) - после последовательной цепи

Схему рис. 14.5, а целесообразно использовать при измерении мощности высокоомной нагрузки, а схему рис. 14.5, б – низкоомной.

Промышленность выпускает многопредельные ваттметры с пределами по току от 20 мА до 70 А и по напряжению от 15 до 600 В. Классы точности 0,1; 0,2; 0,5.

Ферродинамические ваттметры имеют класс точности 1,5 ÷ 2,5.

4. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

Электромагнитные приборы применяются для измерения постоянных и переменных токов и напряжений, частоты и фазового сдвига между переменными током и напряжением. Низкая стоимость и удовлетворительные характеристики способствуют широкому применению приборов.

Измерительный механизм с плоской катушкой (рис. 14.6) состоит из

катушки I с обмоткой из медного провода, имеющей воздушный зазор; сердечника 2 из ферромагнитного материала (пермалоя); оси с опорами 3 (или растяжки). Противодействующий момент создается спиральной пружиной или растяжками. Успокоение магнитоиндукционное или жидкостное.

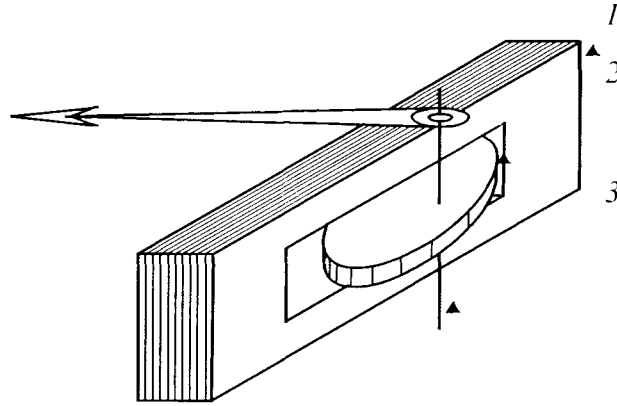


Рис. 14.6. Схема электромеханического измерительного механизма

При протекании тока I через катушку в ней возникает магнитное поле. Оно воздействует на сердечник 2 , то есть стремится расположить его так, чтобы энергия магнитного поля была наибольшей. Известно, что максимальное значение энергии магнитного определяется выражением

$$W_M = \frac{1}{2} I^2 L,$$

где L – индуктивность катушки.

При перемещении сердечника меняется индуктивность катушки L , поэтому, в соответствии с (13.1), выражение для вращающего момента M принимает вид::

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

Если через катушку протекает переменный ток $i(t) = I_m \cdot \sin \omega t$, то подвижная часть, в силу ее инерционности, реагирует только на среднее значение вращающего момента, причем

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

где I – действующее значение тока.

При статическом равновесии измерительного механизма наступает равенство вращающего и противодействующего моментов $M = -M_{np}$. Подставляя в это равенство вместо моментов M и M_{np} их значения, получаем:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{dt} I^2 = W_{yo} \alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{1}{2W_{yo}} \cdot \frac{dL}{dt} I^2.$$

Таким образом, шкала электромагнитного измерительного прибора неравномерная. Выбором формы сердечника удастся приблизить её к равномерной, начиная с 15 ÷ 20% конечного значения.

Достоинства механизмов: пригодность к работе в цепях постоянного и переменного тока, устойчивость к токовым перегрузкам, простота конструкции, повышенная чувствительность у механизма с замкнутым магнитопроводом.

Недостатки: неравномерная шкала, влияние внешних магнитных полей, большое потребление мощности. При использовании в цепях постоянного тока возникает погрешность от гистерезиса намагничивания сердечника.

Промышленность выпускает переносные амперметры и вольтметры с классом точности 0,5. Верхний предел измерения амперметров может изменяться от 0,5 мА до 10 А, а вольтметров – от 1,5 до 600 В. Приборы применяются в цепях постоянного и переменного тока рассчитаны на частоты от 45 до 10000 Гц.

Класс точности однопредельных щитовых электромагнитных приборов 1,0; 1,5; 2,5.

5. ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Электростатические приборы применяются для измерения напряжения постоянного и переменного тока. Вращающий момент в электростатических механизмах возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, одна из которых подвижна. Источником вращающего момента является электрическое поле.

Устройство электростатического механизма приведено на рис. 14.7. Неподвижная часть 1 состоит из одной или нескольких камер. Камеры образованы двумя соединенными пластинами, образующими воздушный зазор. В этот зазор входит подвижный электрод 2. Он укреплен на оси 3 вместе с указателем 4. Под действием приложенного к электродам 1 и 2 напряжения U создается электрическое поле. Силы поля стремятся повернуть подвижную часть механизма так, чтобы энергия электрического поля $W_{\text{э}} = \frac{1}{2} \cdot U^2 C$ была наибольшей. Успокоители подвижной части механизма – воздушные или магнитоиндукционные.

Вращающий момент при постоянном напряжении определяется выражением:

$$M = \frac{dW_{\text{э}}}{d\alpha} = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}.$$

Если напряжение переменное – $u(t) = U_m \sin \omega t$, то подвижная часть механизма, в силу своей инерционности, реагирует на среднее за период значение вращающего момента

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

где U – действующее значение переменного напряжения.

Следовательно, выражение для угла поворота имеет вид

$$\alpha = \frac{1}{2W} \cdot U^2 \cdot \frac{dC}{d\alpha}. \quad (14.11)$$

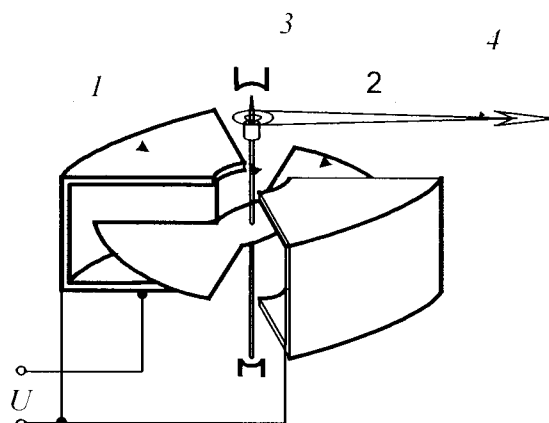


Рис. 14.7. Схема электростатического измерительного механизма

Выражение (14.11) показывает, что зависимость между углом отклонения подвижной части механизма и измеряемой величиной не линейная. Поэтому электродам придают такую форму, при которой зависимость $dC/d\alpha$ обеспечивает линейность шкалы, начиная от 15%.

Вращающий момент электростатического механизма мал. Это не позволяет сделать на его базе вольтметр для измерения напряжений меньше 10 В .

Достоинства электростатических измерительных механизмов: на электростатические вольтметры почти не влияет температура, частота и форма напряжения, внешние магнитные поля; потребляемая мощность мала, а в цепи постоянного тока при установившемся режиме, равна нулю.

Отечественная промышленность выпускает переносные и щитовые однопредельные и многопредельные электростатические вольтметры классов точности 0,5; 1,0; 1,5 на напряжения от 10 В до 300 кВ , на частоты до 10 МГц . Для расширения диапазона электростатических вольтметров на переменном токе включаются добавочные конденсаторы C_d или емкостные делители напряжения.