

# Тема: Электромеханические приборы

# **1 Общие вопросы устройства и теории электромеханических**

## **приборов 1.1 Устройство**

### **электромеханических приборов**

*Электромеханическими* называются измерительные приборы непосредственной оценки, в которых электромагнитная энергия, подведенная к прибору непосредственно из измеряемой цепи, преобразуется в механическую энергию углового перемещения подвижной части относительно неподвижной.



Рис. 1 Структурная схема электромеханического прибора

**Измерительная цепь** обеспечивает преобразование электрической измеряемой величины  $X$  в некоторую промежуточную электрическую величину  $Y$  (ток или напряжение), функционально связанную с измеряемой величиной  $X$ , непосредственно воздействующую на измерительный механизм (ИМ).

***Измерительный механизм,***  
являясь основной частью конструкции прибора, преобразует электромагнитную энергию в механическую энергию, необходимую для отклонения его подвижной части относительно неподвижной на угол  $\alpha$ .

***Отсчетное устройство*** состоит из указателя и шкалы. Оно преобразует угловое перемещение подвижной части в перемещение указателя  $l$ , которое выражается в делениях шкалы.

В зависимости от принципа преобразования электромагнитной энергии в механическое угловое перемещение подвижной части ИМ, электромеханические приборы подразделяются на следующие группы (системы):

- 1) *магнитоэлектрические;*
- 2) *электромагнитные;*
- 3) *электродинамические;*
- 4) *ферродинамические;*
- 5) *электростатические;*
- 6) *индукционные;*

## 1.2 Моменты, действующие на подвижную часть

### электро механических приборов

Подвижная часть ИМ представляет собой механическую систему с одной степенью свободы относительно оси вращения.

Дифференциальное уравнение моментов, описывающее работу ИМ, имеет вид

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \sum M$$

где  $J$  — момент инерции подвижной части ИМ;  
 $\alpha$  — угол отклонения подвижной части.

На подвижную часть ИМ при ее движении действуют:

**вращающий** момент  $M$ , определяемый для всех электромеханических приборов скоростью изменения энергии электромагнитного поля  $W_{\text{эм}}$ , сосредоточенной в механизме, по углу отклонения  $\alpha$  подвижной части

$$M = \frac{dW_{\text{эм}}}{d\alpha}$$

Вращающий момент является некоторой функцией измеряемой величины  $X$  и может также зависеть от угла поворота подвижной части  $\alpha$ , т.е.

$$M = F(X, \alpha)$$



**противодействующий** момент  $M_{np.}$ , создаваемый механическим путем с помощью спиральных пружин, растяжек, и пропорциональный углу отклонения  $\alpha$  подвижной части:

$$M_{np.} = -W\alpha$$

где  $W$  — удельный противодействующий момент на единицу угла закручивания пружины (зависит от материала пружины и ее геометрических размеров);

**момент успокоения**  $M_{усп}$ , т.е. момент сил сопротивления движению, всегда направленный навстречу движению и пропорциональный угловой скорости отклонения:

$$M_{усп} = -P \frac{d\alpha}{dt}$$

где  $P$  — коэффициент успокоения (демпфирования).

Подставив (2), (3) и (4) в (1), получим дифференциальное уравнение отклонения подвижной части ИМ:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = M + M_{np.} + M_{усп}$$

ИЛИ

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = M$$

Установившееся отклонение подвижной части ИМ определяется равенством вращающего  $M$  и противодействующего  $M_{np.}$  моментов, т.к. два первых члена левой части дифференциального уравнения (5) равны нулю. Подставив в равенство аналитические выражения моментов, получим уравнение преобразования (функцию преобразования, статическую характеристику)

$$\alpha = F(X, A_1, A_2, \dots, A_n),$$

где -  $A_1, A_2, \dots, A_n$  параметры прибора.

## **2 Магнитоэлектрические измерительные механизмы и приборы**

### **2.1 Устройство и принцип действия магнитоэлектрического измерительного механизма**

**Принцип действия.** В магнитоэлектрических приборах вращающий момент создается в результате взаимодействия магнитного поля постоянного магнита и проводника с током, выполняемого обычно в виде катушки.

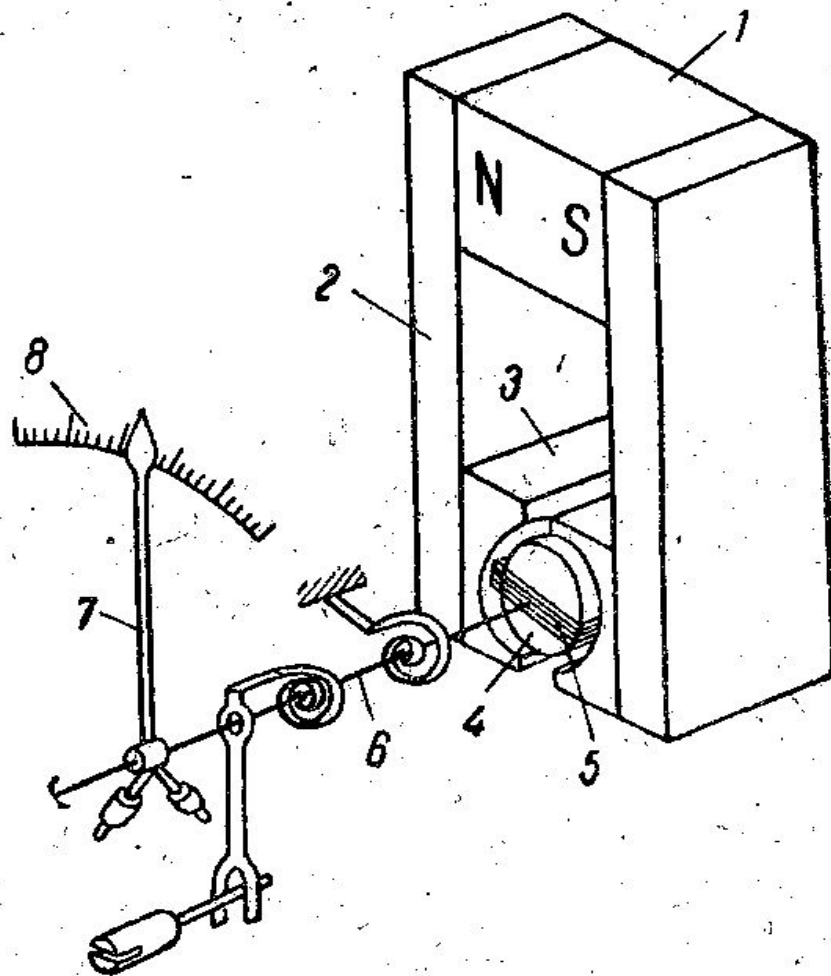


Рис. 2 Устройство магнитоэлектрического измерительного механизма

Цилиндрическая форма сердечника и расточки полюсных наконечников, а также их концентрическое расположение обеспечивают равномерность поля в воздушном зазоре, т. е. в любой точке рабочей части воздушного зазора магнитная индукция  $\mathbf{B} = \text{const}$ . Воздушный зазор имеет радиальную длину порядка 1-2 мм.

Уравнение преобразования для магнитоэлектрического измерительного механизма имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{Bsw}{W} I \neq S_I I,$$



где  $\alpha$  – угол поворота подвижной части;

$B$  – вектор магнитной индукции в  
воздушном зазоре;

$s$ - площадь рамки;

$w$ - число витков обмотки рамки;

$I$ - ток в рамке;

$W$ - удельный противодействующий  
момент спиральных пружин;

$$S_{I \text{ по } W} = \frac{Bsw}{W} \quad \text{- чувствительность механизма}$$

току.

Из уравнения (6) видно, что чувствительность магнитоэлектрического прибора не зависит от угла отклонения и постоянна по всей шкале, т. е. магнитоэлектрические приборы имеют равномерную шкалу.

Благодаря сильному собственному магнитному полю влияние посторонних полей на показания приборов весьма незначительно.

Достоинством магнитоэлектрических приборов также является высокая чувствительность и малое собственное потребление мощности.

Недостатками магнитоэлектрических приборов являются:

относительно сложная и дорогая конструкция;

невысокая перегрузочная способность (при перегрузке обычно перегорают токоподводящие пружинки для создания противодействующего момента);

возможность применения, при отсутствии преобразователей, лишь для измерений в цепях постоянного тока.

## 2.2 Магнитоэлектрические амперметры и вольтметры

Измерительные механизмы амперметров и вольтметров принципиально не различаются между собой. В зависимости от назначения прибора (для измерения тока или напряжения) меняется его измерительная цепь.

В амперметрах измерительный механизм включается в цепь непосредственно или при помощи шунта.

В вольтметрах последовательно с измерительным механизмом включается добавочное сопротивление.

Амперметр без шунта применяется в том случае, если весь измеряемый ток можно пропустить через токоподводящие пружинки и обмотку рамки ИМ (обычно до 30... 50 мА).

Расширение пределов измерения амперметров достигается включением шунта параллельно прибору (Рис. 3).

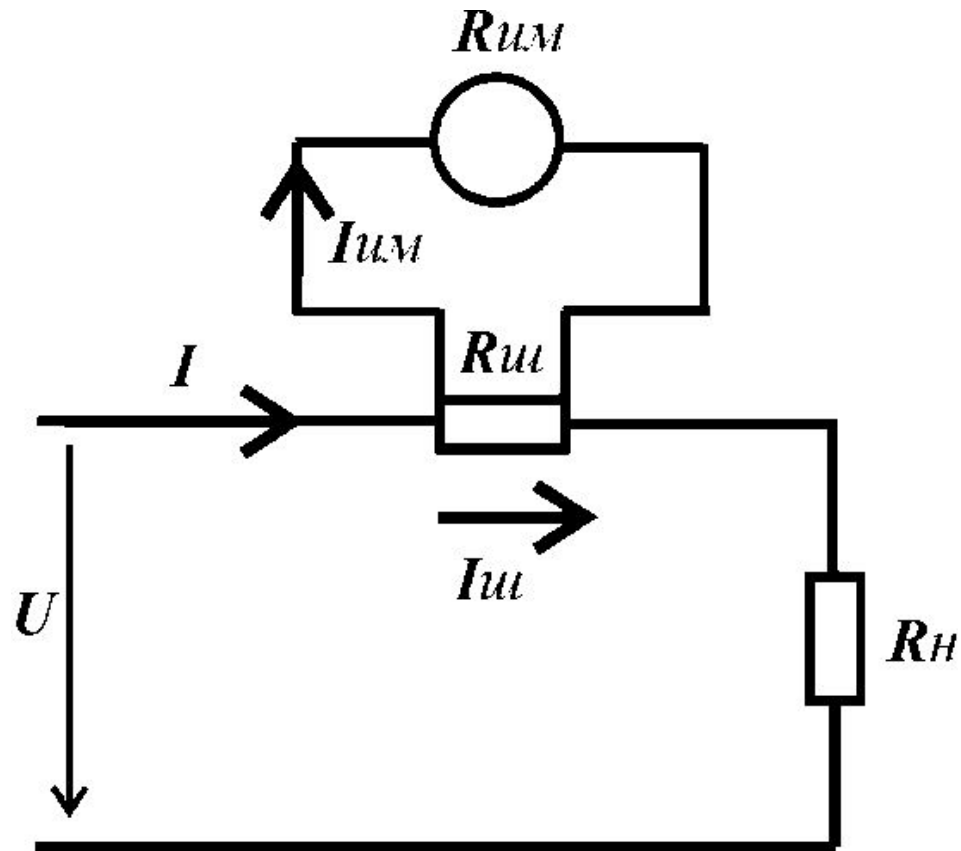


Рис. 3 Схема магнитоэлектрического амперметра с шунтом

Если необходимо иметь верхний предел измерения амперметра  $I$ , а верхний предел измерения без шунта  $I_{ум}$ , то сопротивление шунта  $Rш$  рассчитывается исходя из соотношения (сопротивление шунта и измерительного механизма включены параллельно и следовательно на них одно и тоже напряжение):

$$R_{ш} I_{ш} = R_{ум} I_{ум} \quad (7)$$

Откуда

$$R_{ш} = \frac{I_{ум} R_{ум}}{I_{ш}} \quad (8)$$

По 1-му закону Кирхгофа

$$I_{ш} = I - (n-1)I_{шм}$$

Если обозначить отношение токов  $\frac{I}{I_{шм}} = n$

(коэффициент шунтирования), то с учетом (9) соотношение (8) можно записать в виде:

$$R_{ш} = \frac{(10)_{шм}}{n-1}$$

Шунты изготавливаются из манганина, сплава, имеющего температурный коэффициент сопротивления близкий к



Для расширения пределов измерения вольтметров применяют добавочные сопротивления (резисторы). Добавочные сопротивления включают в цепь последовательно с ИМ (Рис. 4).

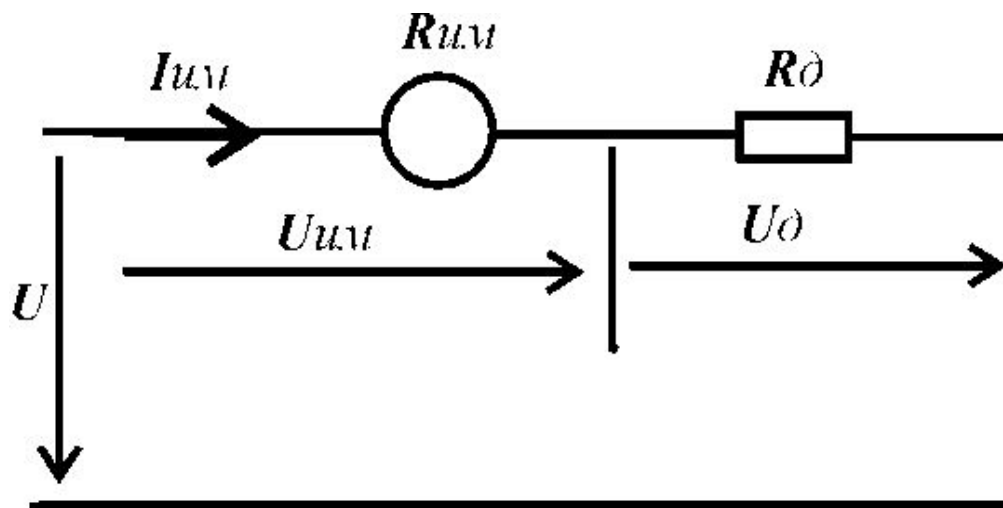


Рис. 4 Схема магнитоэлектрического вольтметра

При выборе величины добавочного сопротивления исходят из условия, чтобы сила тока через ИМ не превышала значения, предельного для данного ИМ (тока полного отклонения).

$$I_{им} = \frac{U_{им}}{R_{им}} = \frac{U}{R_{им} + R_{\delta}}$$

Обозначив  $\frac{U}{U_{им}} = m$  из (11) получим

$$R_{\delta} = R_{им} (m - 1)$$

## 2.3 Магнитоэлектрические логометры

В логометрах противодействующий момент создается не механическим путем, а электрическим.

Для этого в магнитоэлектрическом логометре (рис. 5) подвижная часть выполняется в виде двух жестко скрепленных между собой рамок 1 и 2, по обмоткам которых протекают токи  $I_1$  и  $I_2$ .

Пружинки для создания механического противодействующего момента не ставятся, а ток к обмоткам подводится с помощью безмоментных токоподводов, выполняемых в

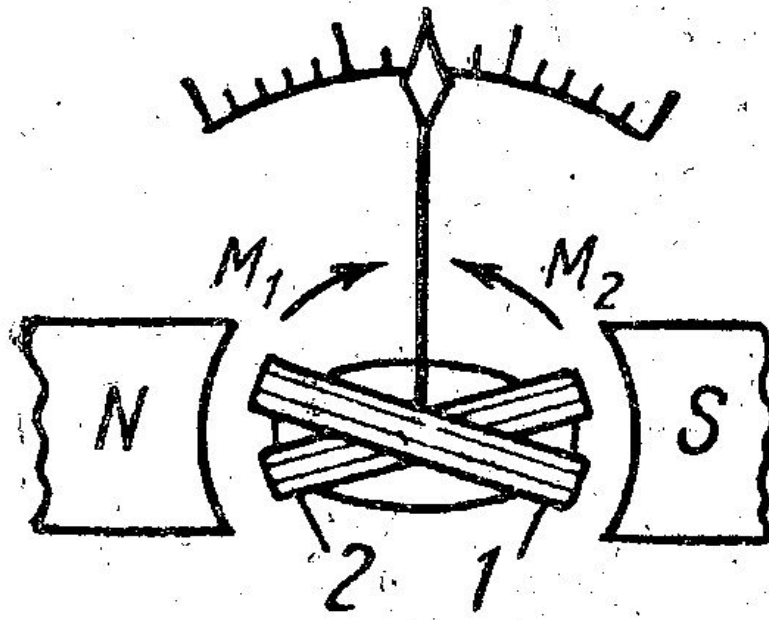


Рис. 5 Устройство логометра

Направления токов в обмотках выбираются так, чтобы моменты  $M_1$  и  $M_2$ , создаваемые рамками, действовали навстречу друг другу.

Один из моментов может считаться вращающим, а второй - противодействующим. Кроме того, хотя бы один из моментов должен зависеть от угла поворота. Значит, один (или несколько) из параметров, определяющих величину момента, должен являться функцией угла  $\alpha$ .

Технически наиболее просто сделать зависящей от угла поворота индукцию **B**. Для этого магнитное поле в зазоре должно быть неравномерным, что достигается неравномерностью зазора (с этой целью сердечник сделан эллипсоидальным).

Можно показать, что, в конечном счете, уравнение преобразования для логометра имеет следующий вид:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right)$$

Из выражения (13) видно, что логометр измеряет отношение токов в обмотках (отсюда и название логометр, что в переводе с греческого означает – измеритель отношения).

## **2.4 Магнитоэлектрические омметры**

В конструкциях омметров используются измерительные механизмы с механическим противодействующим моментом («обычные») и логометрические измерительные механизмы.

### **2.4.1 Омметры на основе «обычного» ИМ**

В зависимости от величины измеряемого сопротивления используются две схемы, представленные на рис. 6а и 6б.

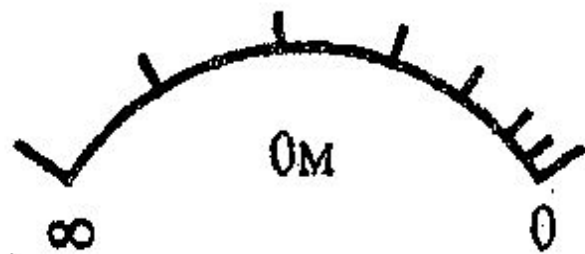
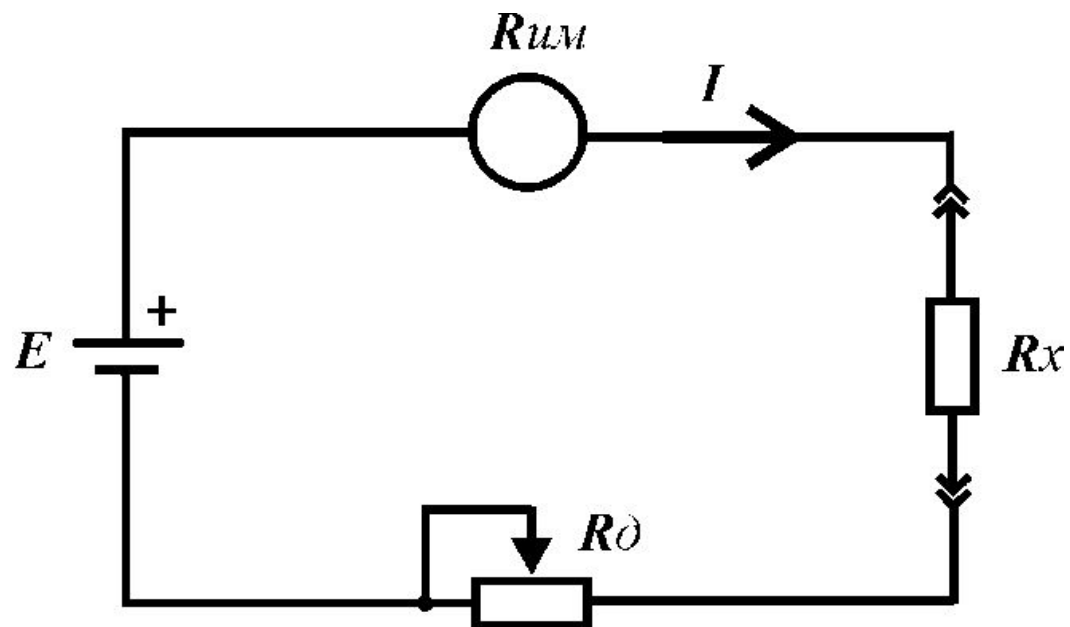


Рис. 6а



В первом случае (рис. 6а), ток через ИМ определяется по формуле:

$$I = \frac{E}{R_{им} + R_{\partial} + R_x} \quad (14)$$

Из уравнения преобразования (6), с учетом (14) получим:

$$\alpha = S_I I = S_I E \frac{1}{R_{им} + R_{\partial} + R_x} \quad (15)$$

При постоянных значениях  $R_{им}$ ,  $R_d$  и  $E$  отклонение указателя прибора  $\alpha$  однозначно определяется измеряемым сопротивлением  $R_x$ , т.е. шкала прибора может быть проградуирована в единицах сопротивления.

Как видно из (15) шкала такого омметра неравномерна, при этом нулевая отметка располагается на правом краю (нулевому значению измеряемого сопротивления  $R_x$  соответствует максимальный ток  $I$ ).

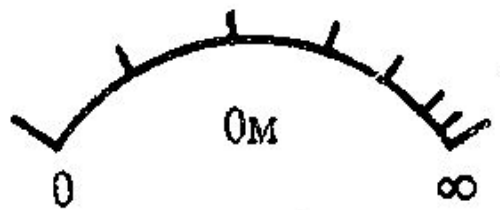
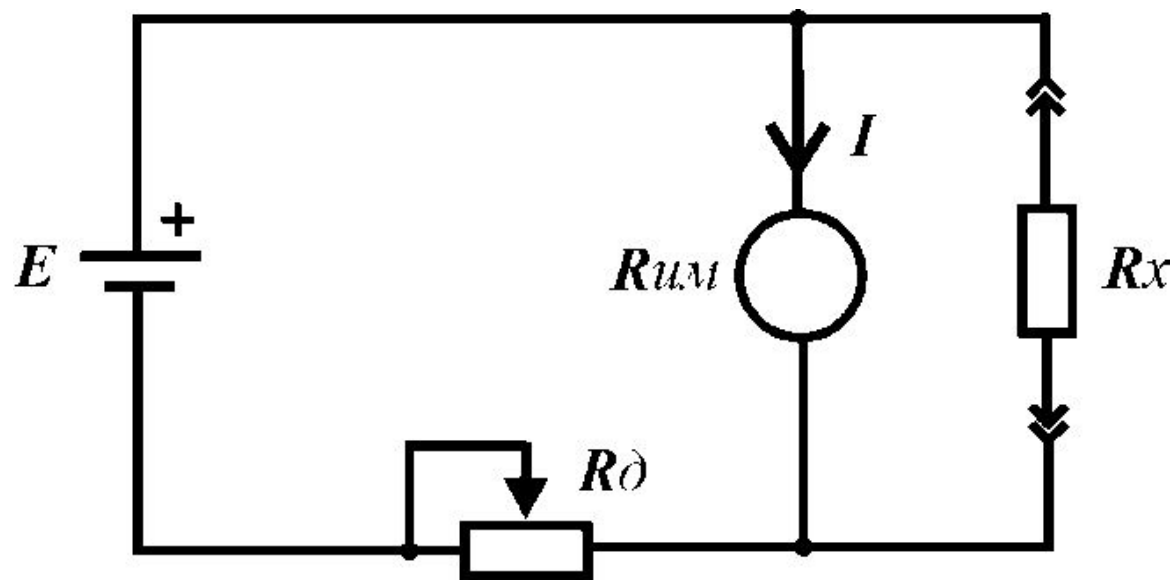


Рис. 6б

Для второй схемы (рис. 6б) уравнение преобразования имеет вид:

$$\alpha = S_I E \frac{R_x}{R_\partial (R_{ум} + R_x) + R_{ум} R_x} \quad (16)$$

Как видно из (16) шкала прибора также неравномерна, но нулевая отметка находится на «привычном» месте, т.е. слева.

Общий недостаток данных приборов – зависимость показаний от напряжения источника питания, что требует подстройки «нуля» перед каждым измерением.

## 2.4.2 Омметры на основе логометрического

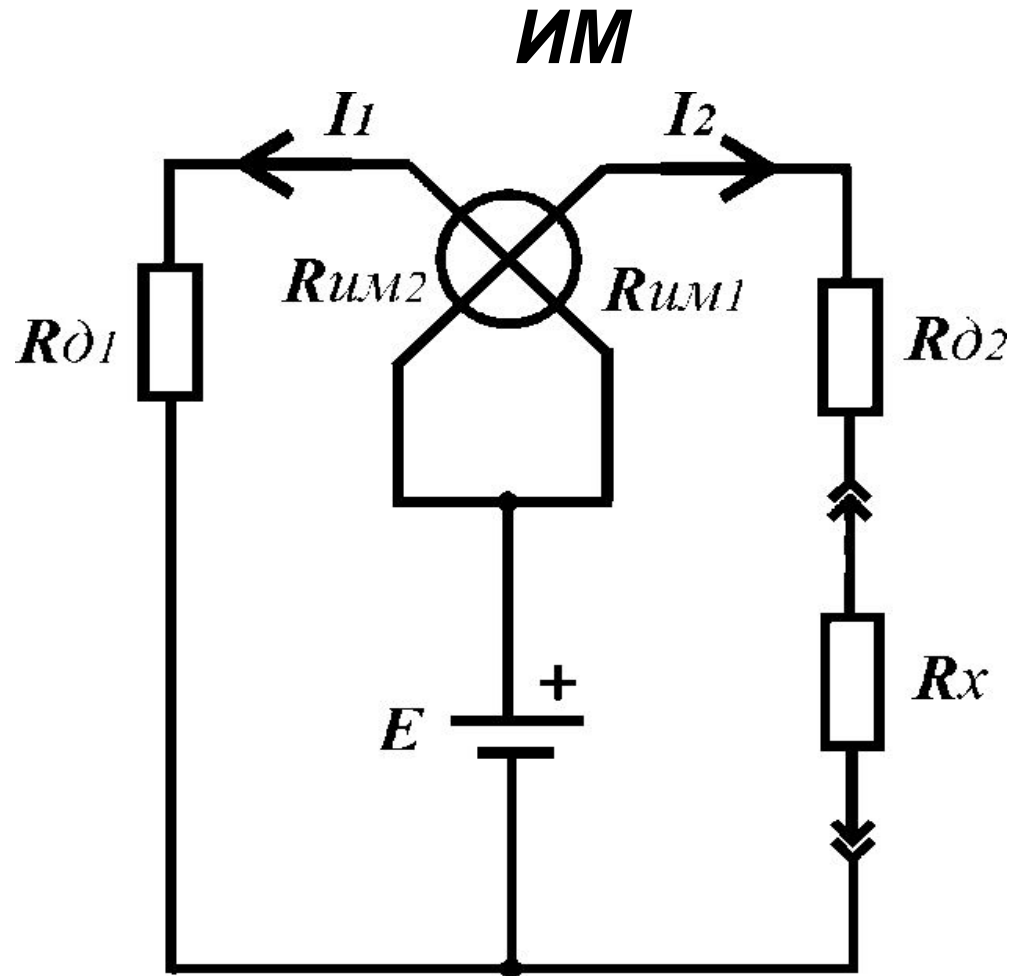


Рис. 7 Схема омметра на основе логометрического ИМ

Из схемы (рис. 7):

$$I_1 = \frac{E}{R_{um1} + R_{\partial 1}}; \quad I_2 = \frac{(17) E}{R_{um2} + R_{\partial 2} + R_x}$$

С учетом (17) уравнение преобразования имеет вид:

$$\alpha = F\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = F\left(\frac{R_{um2} + R_{\partial 2} + R_x}{R_{um1} + R_{\partial 1}}\right) \quad (18)$$

Из (18) видно, что показания данного омметра не зависят от напряжения источника питания, что является его достоинством.

## 2.5 Магнитоэлектрические приборы с преобразователями

Использование преобразователя переменного тока в постоянный, позволяет выполнять измерения магнитоэлектрическим прибором в цепях переменного тока.

В зависимости от вида используемого преобразователя различают **выпрямительные и термоэлектрические** приборы.

На рис. 8а приведена одна из возможных схем амперметра выпрямительной системы, а на рис. 8б – термоэлектрической.

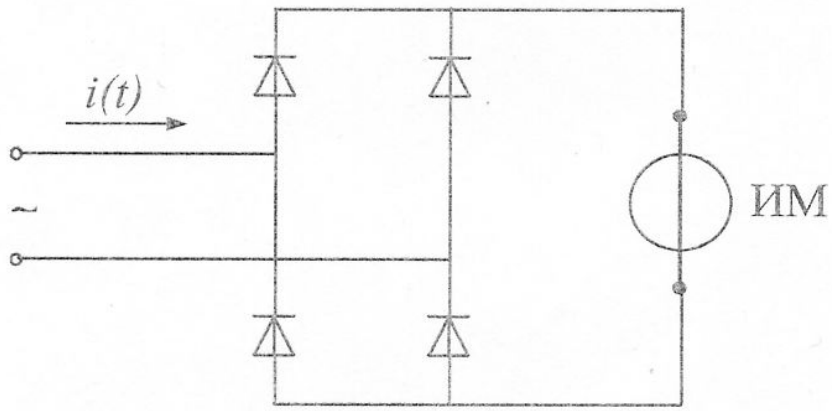


Рис. 8а

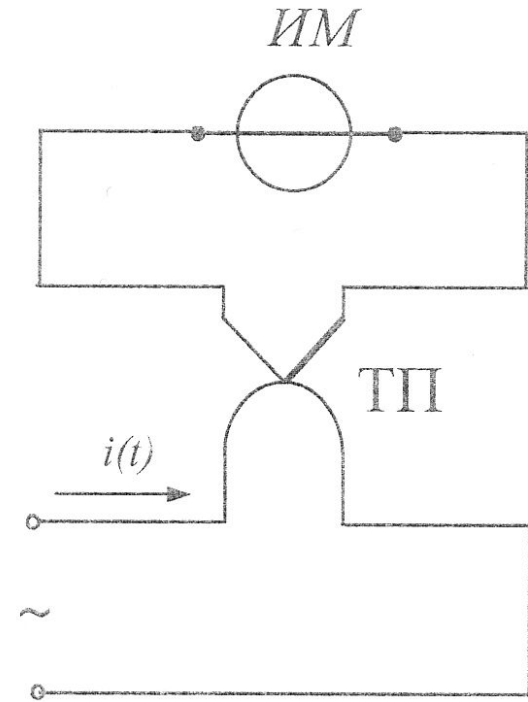


Рис. 8б



В амперметре выпрямительной системы измеряемый ток  $i(t)$  выпрямляется и проходит через обмотку катушки магнитоэлектрического ИМ. Показание прибора пропорционально среднему по модулю за период  $T$  значению тока:

$$I_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt \quad (19)$$

Все приборы выпрямительной системы градуируются в действующих значениях токов (или напряжений) синусоидальной формы и не предназначены для измерений в цепях с токами произвольной формы.

В амперметре термоэлектрической системы измеряемый ток  $i(t)$  проходит через нагреватель термопреобразователя **ТП**. При его нагреве на свободных концах термопары возникает термо-ЭДС, вызывающая постоянный ток через обмотку катушки магнитоэлектрического **ИМ**.

Значение этого тока нелинейно зависит от действующего значения  $I$  измеряемого тока  $i(t)$  и мало зависит от его формы и спектра.

Схемы вольтметров выпрямительной и термоэлектрической систем отличаются от

### 3 Электромагнитные измерительные механизмы и приборы

**Принцип действия** приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля, создаваемого током в неподвижной катушке, с подвижным ферромагнитным сердечником.

Одна из конструкций электромагнитного механизма представлена на рис. 9, где 1 - катушка; 2 - сердечник, укрепленный на оси прибора; 3 - воздушный успокоитель; 4 - спиральная пружина, создающая противодействующий момент

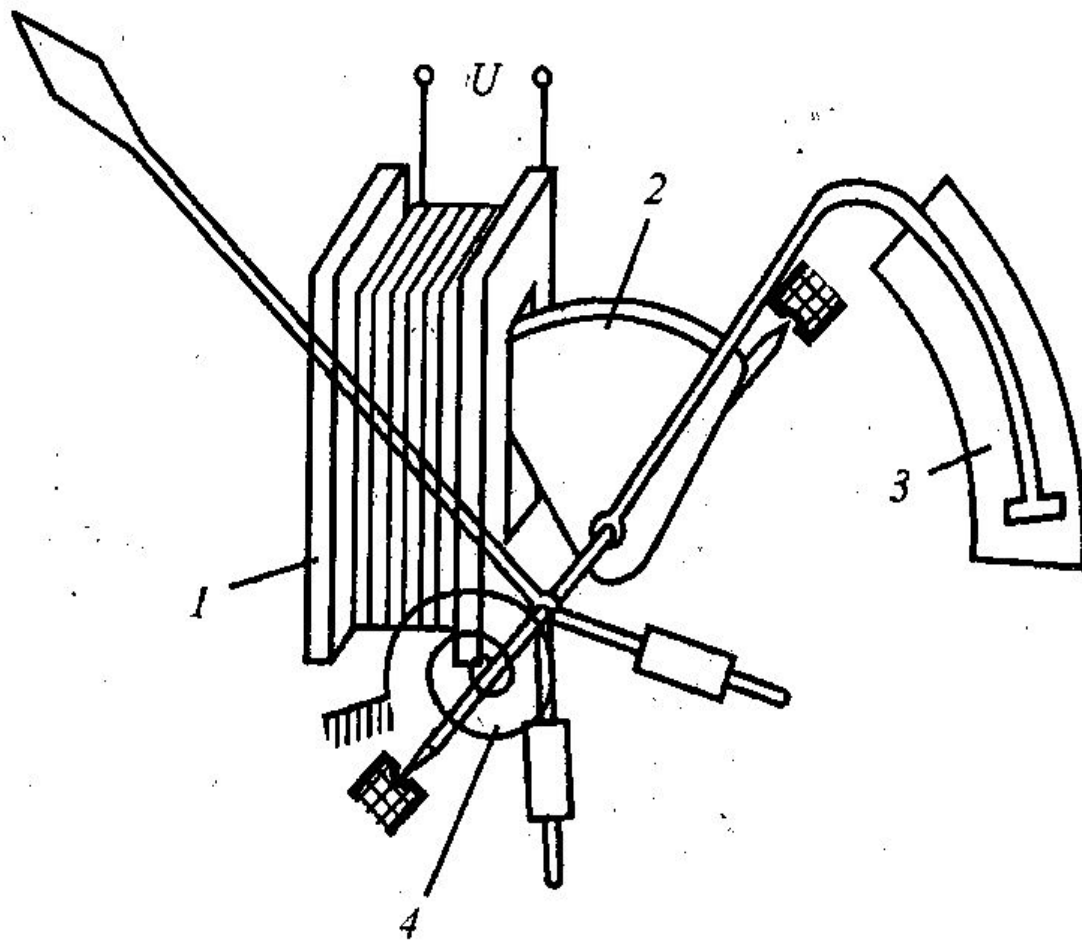


Рис. 9 Устройство прибора  
электромагнитной системы

Уравнение преобразования для электромагнитного ИМ имеет следующий вид:

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

где  $L$  – индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником;

$I$  – сила постоянного тока или действующее значение переменного тока;

$W$  – удельный противодействующий момент спиральных пружин.

Таким образом, электромагнитные приборы одинаково пригодны для измерений в цепях постоянного и переменного тока.

В соответствии с (20) шкала прибора квадратичная, однако на практике ее можно приблизить к линейной (линеаризовать) подбором формы сердечника.

**Достоинствами** приборов электромагнитной системы являются простота конструкции и как следствие – высокая надежность, способность выдерживать значительные перегрузки.

К недостаткам приборов можно отнести большое собственное потребление энергии, невысокую точность, малую чувствительность и сильное влияние магнитных полей.

Промышленностью выпускаются амперметры электромагнитной системы с верхним пределом измерения от долей ампера до 200 А, и вольтметры с пределами измерения от долей вольта до сотен вольт.

Приборы электромагнитной системы применяются в основном в качестве щитовых амперметров и вольтметров переменного

## **4 Электродинамические и ферродинамические измерительные механизмы и приборы**

### **4.1 Устройство и принцип действия электродинамического ИМ**

**Принцип действия.** Работа измерительных механизмов электродинамической системы основана на взаимодействии магнитных полей двух катушек с токами: неподвижной 1 и подвижной 2 (рис. 10а и 10б).

Подвижная катушка, укрепленная на оси или растяжках, может поворачиваться



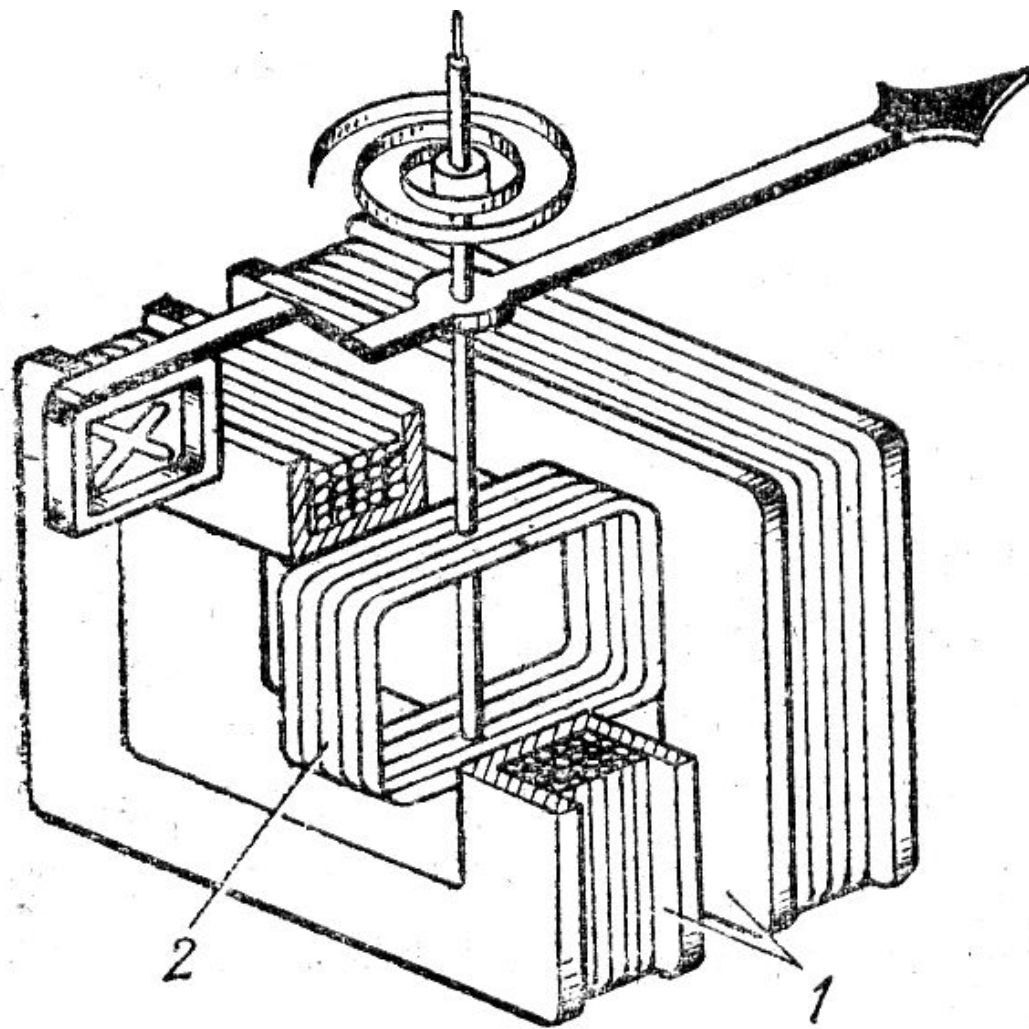


Рис. 10а Устройство электродинамического ИМ

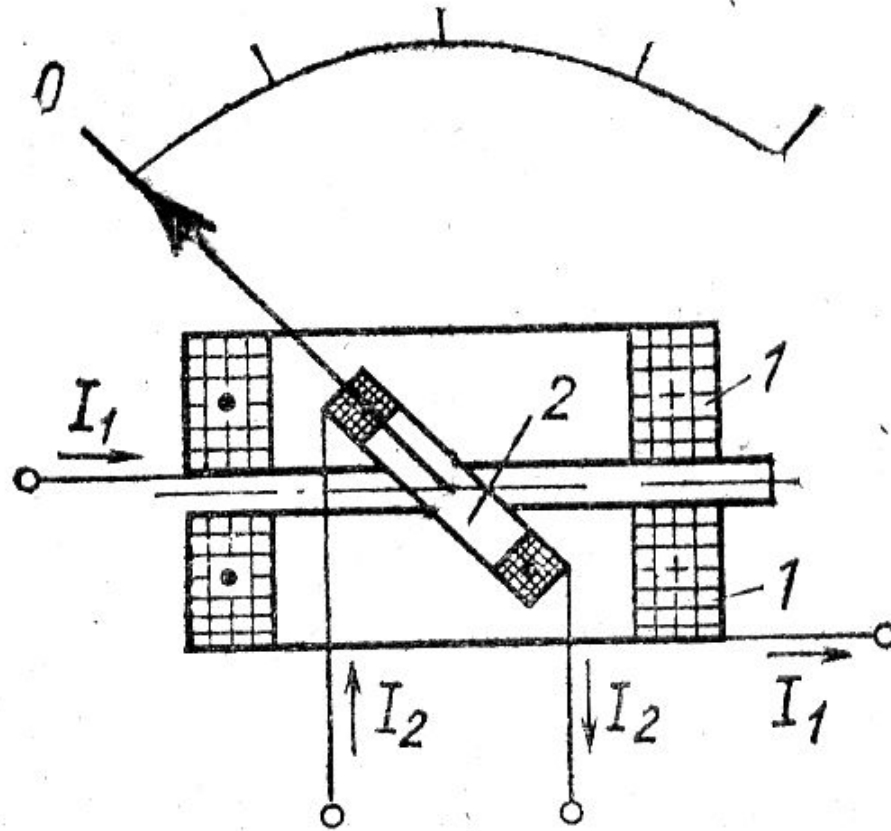


Рис. 10б Принцип действия  
электродинамического ИМ

Неподвижная катушка 1 обычно выполняется из двух одинаковых частей, разделенных воздушным зазором. Благодаря этому обеспечиваются требуемая конфигурация магнитного поля и удобство расположения оси.

Неподвижная и подвижная катушки механизма (обычно бескаркасные) имеют круглую или прямоугольную форму и изготавливаются из медного или алюминиевого провода.

Для подвода тока к подвижной катушке используются спиральные пружины или растяжки

Уравнение преобразования для электродинамического ИМ, работающего на переменном токе имеет следующий вид:

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I_1 I_2 \cos \psi \quad (21)$$

где  $M_{12}$  - взаимная индуктивность между катушками;

$\psi$  - угол сдвига фаз между токами в катушках.

При протекании по катушкам постоянных токов уравнение преобразования можно представить в следующем виде:

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{(22)}^{(22)}}{d\alpha} I_1 I_2$$

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

Собственное магнитное поле электродинамических механизмов, силовые линии которого замыкаются по воздуху, невелико, поэтому электродинамические ИМ сильно подвержены влиянию внешних магнитных полей.

Для защиты от таких влияний применяется экранирование, т.е. измерительный механизм помещают внутри одного или двух экранов из ферромагнитного материала.

Также недостатками электродинамических ИМ являются: невысокая чувствительность, большое собственное потребление мощности, чувствительность к перегрузкам

## 4.2 Ферродинамические измерительные механизмы

Принцип действия ферродинамических ИМ не отличается от электродинамических.

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

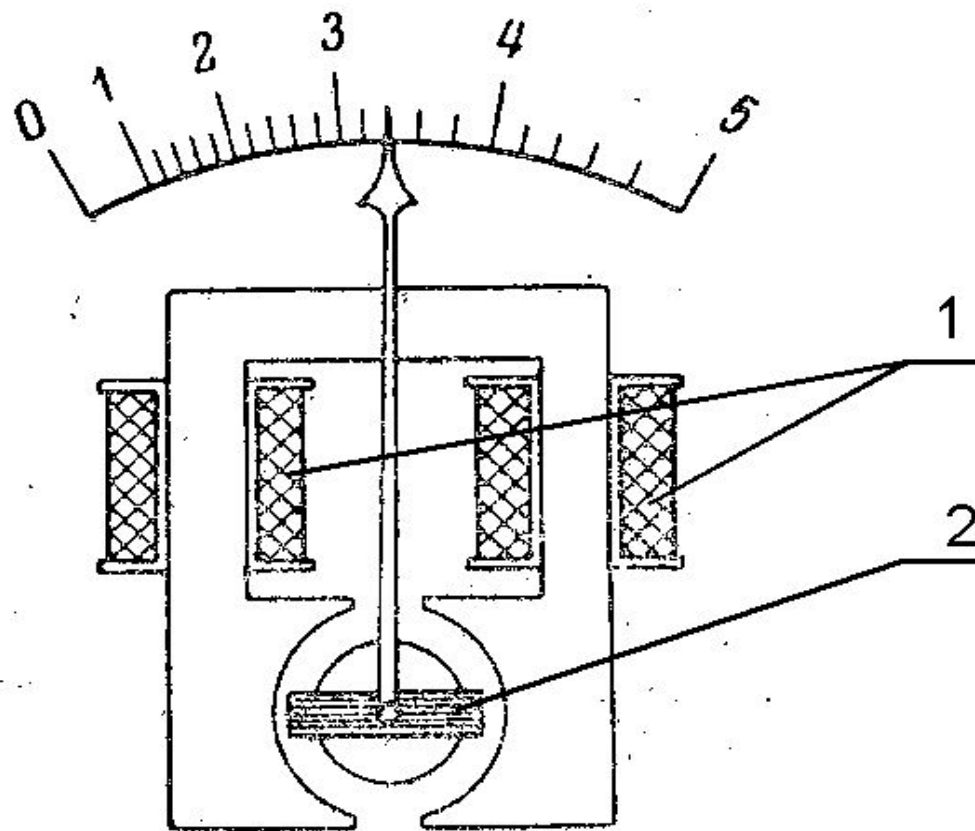


Рис. 11 Устройство ферродинамического ИМ



Неподвижная катушка 1, состоящая из двух половин, расположена на двух стержнях магнитопровода, выполненного из листовой магнитомягкой стали, между концами которого укреплен цилиндрический сердечник.

В воздушном зазоре помещается подвижная катушка 2, укрепленная на одной оси со стрелкой.

В воздушном зазоре образуется сильное равномерное магнитное поле, индукция которого пропорциональна току неподвижной катушки.

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

Благодаря малому сопротивлению магнитной цепи, в воздушном зазоре может быть получена весьма значительная магнитная индукция, а следовательно, и весьма большой

Значительное увеличение вращающего момента по сравнению с электродинамическими механизмами дает возможность увеличить чувствительность ферродинамического ИМ.

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

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

## 4.3 Амперметры и вольтметры электродинамической и ферродинамической системы

У электродинамических амперметров для токов до 0,5 А неподвижная и подвижная катушки соединяются последовательно (рис. 12а).

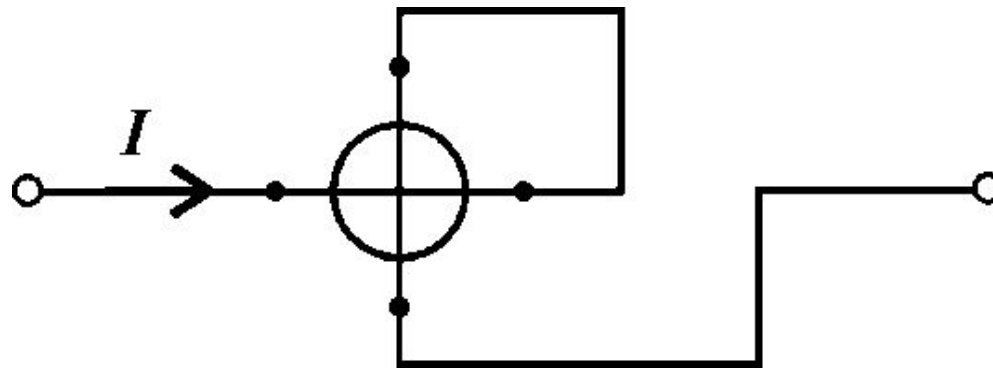


Рис. 12а

Весь измеряемый ток при этом проходит через подвижную и неподвижную катушки, поэтому угол  $\psi = 0$ , и уравнение (21) принимает вид:

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dM_{12}}{d\alpha} I^2$$

У амперметров на токи от 0,5 А и выше катушки соединяются параллельно (рис. 12б).

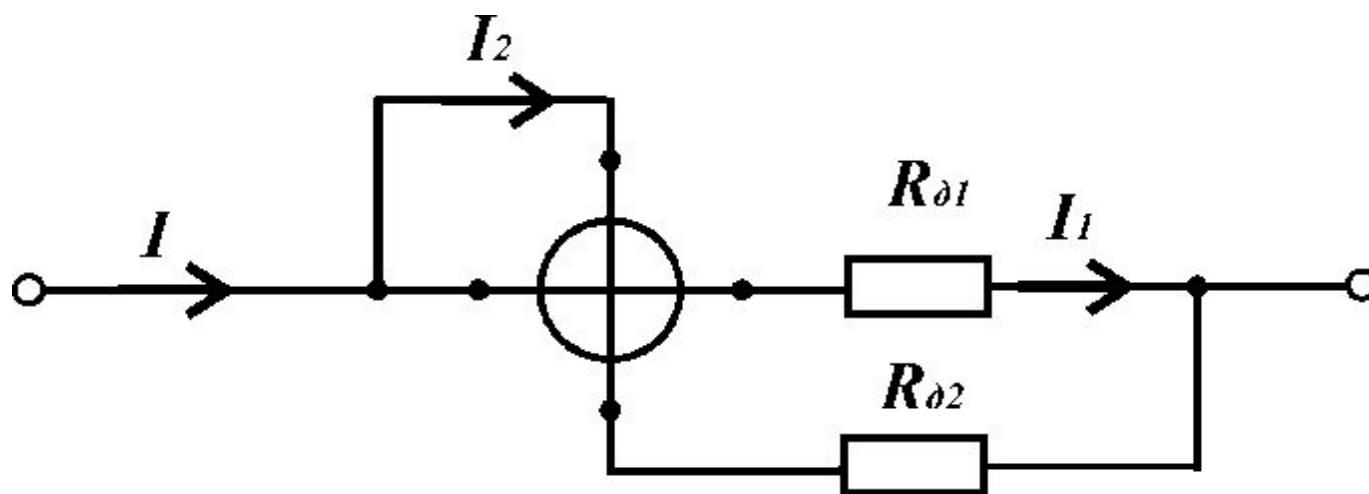


Рис. 12б

Сопротивления параллельных цепей подбираются так, чтобы ток  $I_2$  не превышал допустимого значения, т.е.  $I_1 = k_1 I$  и  $I_2 = k_2 I$  (при этом  $k_1 + k_2 = 1$ ). Уравнение (21) приводится к виду:

$$\alpha = \frac{1}{W} k_1 k_2 \frac{dM_{12}}{d\alpha} I^2 \quad (24)$$

Следовательно, у механизмов амперметров угол отклонения подвижной части зависит от квадрата измеряемого тока и производной  $dM_{12}/d\alpha$ .

У электродинамических вольтметров неподвижная и подвижная катушки соединены последовательно вместе с добавочным резистором из манганина (рис. 13).

Секционированием добавочного резистора можно получить разные пределы измерения  $U_{1ном}$ ,  $U_{2ном}$ ,  $U_{3ном}$ .

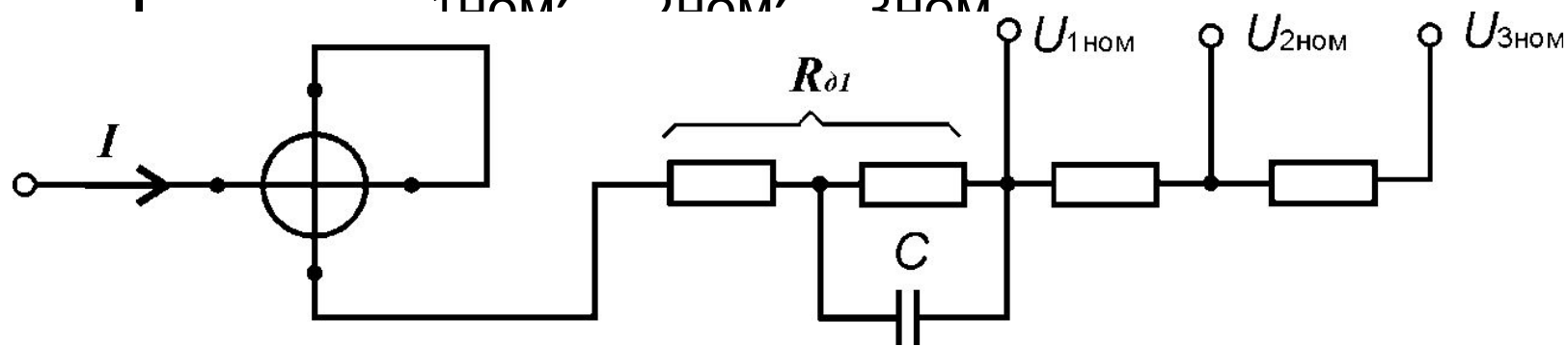


Рис. 13 Схема электродинамического



Если ток полного отклонения  $I = U/Z_v$ ,  
где  $Z_v$  – полное сопротивление вольтметра, то  
подставив его в (21), получим:

$$\alpha = \frac{1}{W Z_v^2} \frac{dM(\alpha)}{d\alpha} U^2$$

т.е. характер шкалы у вольтметра такой же, как  
и у амперметра.

Для получения шкалы, близкой к  
равномерной, у амперметров и вольтметров  
размеры подвижной катушки выбирают так,  
чтобы она находилась в практически  
равномерном магнитном поле.

## 4.4 Ваттметры электродинамической и ферродинамической системы

Электродинамический (ферродинамический) измерительный механизм позволяет построить прибор для измерения активной мощности – ваттметр.

В этом случае (рис. 14) неподвижную катушку включают последовательно с нагрузкой с сопротивлением  $Z_H$ , мощность которой измеряется.

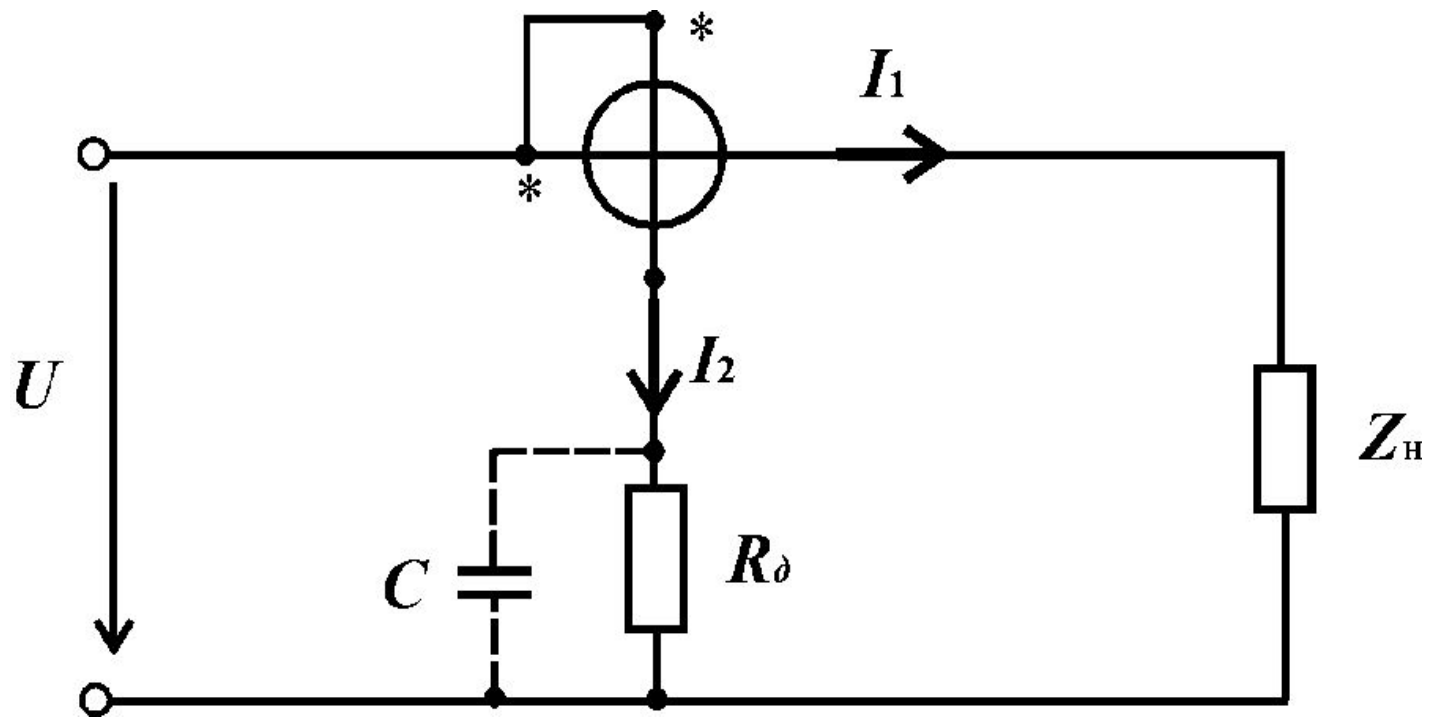


Рис. 14 Схема включения ваттметра

Подвижная катушка с добавочным сопротивлением  $R_{\delta}$  включается параллельно нагрузке.

Цепь неподвижной катушки называют последовательной цепью (токовой обмоткой), а цепь подвижной катушки – параллельной цепью (обмоткой напряжения).

При таком включении

$$I_1 = (2/6) I_H$$

$$I_2' = \frac{U}{Z_U} \quad (27)$$

где  $Z_U$  - полное сопротивление параллельной цепи.

Из треугольника сопротивлений для параллельной цепи (рис. 15а)

$$Z_U = \frac{R_U + R_\delta}{\cos \gamma}$$

где  $R_U$  - активное сопротивление обмотки напряжения;

$\gamma$  – угол сдвига фаз между током и напряжением в параллельной цепи (из-за индуктивности подвижной катушки).

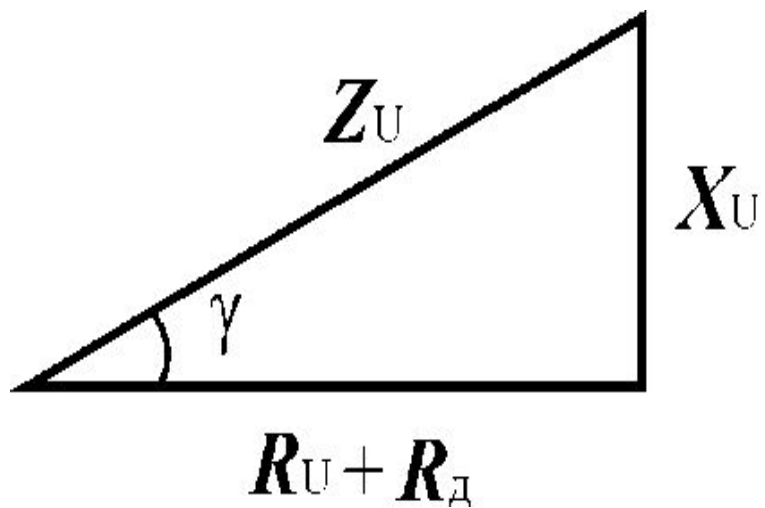


Рис. 15а

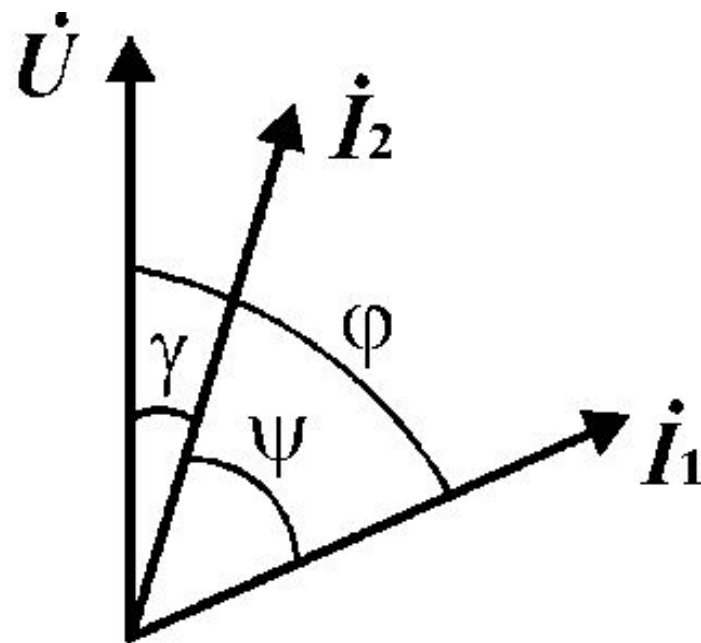


Рис. 15б

С учетом (28) выражение (27) принимает вид

$$I_2 = \frac{U \cos \gamma}{R_U + R_\delta} \quad (29)$$

Тогда (21), с учетом (26) и (29)

$$\alpha = \frac{1}{W(R_U + R_\delta)} \frac{dM_{12}}{d\alpha} \quad (30) \quad U I_H \cos \psi \cos \gamma$$



Конструктивным путем добиваются постоянства производной  $dM_{12}/d\alpha$ .

Обозначив, 
$$\frac{1}{W(R_U + R_\delta)} \frac{dM_{12}}{d\alpha} = S_P$$

(чувствительность по мощности), получим

$$\alpha = S_P U I_n \cos(\overset{(31)}{\varphi} \gamma) \cos \gamma$$

Если обеспечить  $\gamma = 0$ , то

$$\alpha = S_P U I_H \cos(\varphi) = S_P P$$

Т.е. угол поворота подвижной части прямо пропорционален активной мощности нагрузки и, следовательно, шкала такого прибора равномерная.

Равенство  $\gamma = 0$  может быть обеспечено включением параллельно  $R_d$  конденсатора с емкостью  $C$  (на рис. 14 показан штриховой линией).

Однако нужно иметь в виду, что равенство  $\gamma = 0$ , будет лишь при определенной частоте и с изменением частоты от номинального значения появляется погрешность, называемая угловой.

# 5 Электростатические измерительные механизмы и приборы

**Принцип действия.** В электростатических измерительных механизмах перемещение подвижной части происходит в результате взаимодействия системы двух или нескольких электрически заряженных проводников.

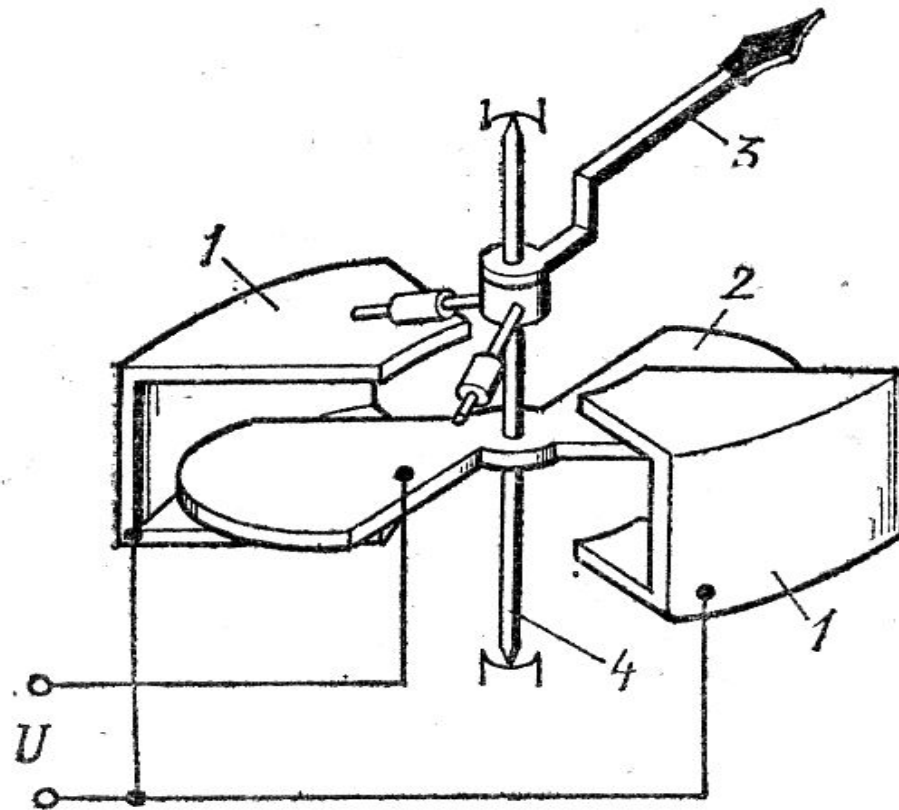


Рис. 16 Устройство электростатического  
ИМ

Под действием подведенного к электродам напряжения  $U$  создаётся электрическое поле.

Силы электрического поля стремятся повернуть подвижную часть так, чтобы энергия электрического поля была наибольшей, т. е. чтобы подвижный электрод втягивался в пространство между неподвижными электродами и поворачивал указатель.

Электроды изготавливаются из алюминия.

Уравнение преобразования для электростатического ИМ имеет следующий вид:

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

где  $C$  – емкость между подвижным и неподвижным электродами.

Очевидно, что на основе такого ИМ, можно строить только вольтметры.

Угол поворота подвижной части электростатического ИМ пропорционален квадрату действующего значения напряжения и множителю  $dC/d\alpha$ , т. е. между измеряемой величиной (напряжением) и углом отклонения нет прямо пропорциональной зависимости.

Выбором соответствующей формы электродов, их размеров и взаимного расположения получают такую зависимость  $dC/d\alpha$ , которая позволяет обеспечить практически равномерную шкалу, начиная от 15 до 100 % верхнего предела измерения.



Собственное электрическое поле электростатических вольтметров незначительное, поэтому на работу приборов сильное влияние оказывают внешние электрические поля.

Для уменьшения этого влияния приборы экранируют. Экран соединяется с одним из электродов и заземляется.

На электростатические вольтметры почти не влияют температура, частота и форма кривой приложенного напряжения и внешние магнитные поля.

Собственное потребление мощности вольтметра на переменном токе мало, а при включении в цепь постоянного тока при установившемся режиме равно нулю (с точки зрения входного сопротивления такие вольтметры близки к идеальным).

## **6 Индукционные измерительные механизмы и приборы**

### **6.1 Устройство и принцип действия индукционного измерительного механизма**

**Принцип действия** индукционных измерительных механизмов основан на взаимодействии переменных магнитных потоков электромагнитов и вихревых токов, индуцированных этими магнитными потоками в подвижной части, выполненной обычно в виде

По числу потоков, пересекающих подвижную часть, измерительные механизмы могут быть однопоточными и многопоточными.

Наибольшее распространение получили многопоточные механизмы, а именно – двухпоточные (рис. 17).

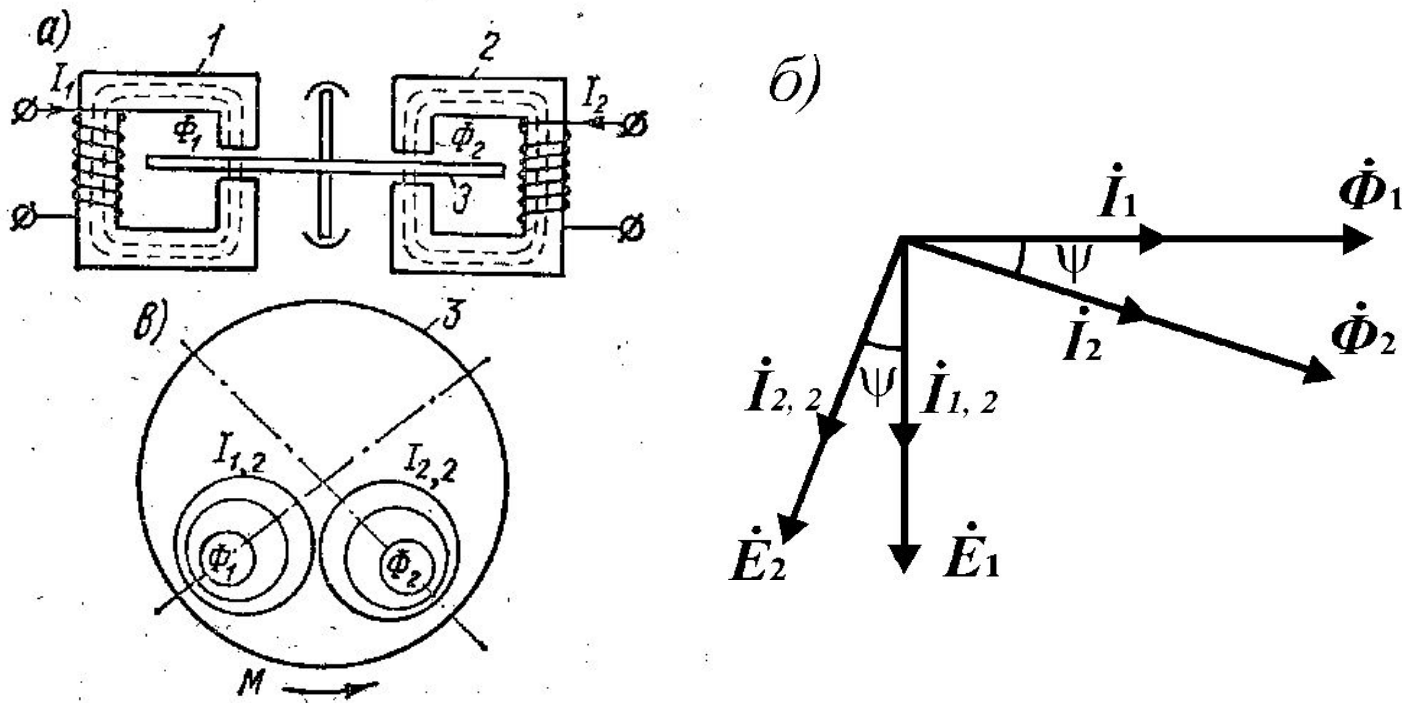


Рис. 17 Индукционный двухпоточный ИМ:

а - устройство; б – векторная диаграмма;

в – диск со следами потоков

Переменные токи  $I_1$  и  $I_2$  протекающие по обмоткам электромагнитов 1 и 2 создают переменные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , смещенные по фазе на угол  $\psi$ .

Переменные магнитные потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$ , пересекая диск 3, индуктируют в нем (в соответствии с явлением электромагнитной индукции) э.д.с.  $E_1$  и  $E_2$ , отстающие от своих потоков на  $90^\circ$ .

Под действием наведенных э.д.с. в алюминиевом диске появляются вихревые токи  $I_{1, 2}$  и  $I_{2, 2}$ .

От взаимодействия вихревого тока  $I_{2, 2}$  с магнитным потоком  $\Phi_1$  и вихревого тока  $I_{1, 2}$  с магнитным потоком  $\Phi_2$  создается вращающий момент, действующий на диск.

Можно показать, что значение для вращающего момента определяется выражением:

$$M_{вр.} = kf\Phi_1\Phi_2 \sin \psi$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый конструктивными параметрами;

$f$  – частота переменного тока.

Из (34) видно, что вращающий момент достигает своего максимального значения, если сдвиг по фазе между потоками равен  $90^\circ$ , и зависит от частоты тока.