



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**Сибирский федеральный университет**

Кафедра «Радиотехника»

20



Красноярск, 2008



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**  
Федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
**Сибирский федеральный университет**  
Кафедра «Радиотехника»

**К.т.н., доцент кафедры РТ Алешечкин Андрей Михайлович**

**Метрология и радиоизмерения**

**Лекция 11. Электромеханические  
измерительные преобразователи**

**Институт инженерной физики и радиоэлектроники**

**Направление 210200.62 Радиотехника**

# План лекции

- 1. Основные узлы электромеханических измерительных приборов
- 2. Магнитоэлектрические приборы
- 3. Электромагнитные приборы
- 4. Электродинамические приборы (ЭДП)
- 5. Ферродинамические приборы
- 6. Электростатические приборы (ЭСП)
- Перечень использованных источников

# Основные узлы электромеханических измерительных приборов

- Электромеханические измерительные приборы относятся к приборам прямого преобразования, в которых электрическая измеряемая величина непосредственно преобразуется в показания отсчётного устройства.
- **Шкала прибора** – это совокупность отметок, расположенных в определённой последовательности и проставленных у некоторых из них чисел отсчёта, которые соответствуют ряду последовательных значений измеряемой величины.
- Цена деления равномерной шкалы равна конечному значению измеряемой величины на шкале  $A_k$  делённому на число делений  $n$ :

$$C = A_k / n$$

- Цену деления обычно выбирают кратной погрешности прибора:  $C=2\Delta$  или  $C=4\Delta$ .
- Указатели бывают стрелочные и оптические, которые состоят из источника света, зеркальца на подвижной части и системы зеркал, направляющих луч на полупрозрачную шкалу.
- Оптические указатели обеспечивают большую чувствительность прибора и меньшую погрешность отсчёта в сравнении со стрелочными указателями.

## ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

- Подвижная часть прибора снабжается осью и полуосями, которые заканчиваются запрессованными в них стальными кернами, опирающимися на корундовые или рубиновые подпятники:

## ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

- Электромеханический прибор содержит следующие основные узлы:
  1. узел, создающий вращающий момент;
  2. узел, создающий противодействующий момент;
  3. узел успокоителя.
- **Вращающий момент** равен

$$M_B = dW_{эм} / d\alpha$$

где  $\alpha$  – угол поворота.

- **Противодействующий момент** можно получить с помощью механических или электромагнитных сил

$$M_{\Pi} = W \cdot \alpha$$

где  $W$  – удельный противодействующий момент, зависящий от свойств упругого элемента.

$$\frac{dW_{эм}}{d\alpha} = W\alpha$$

$$\alpha = \frac{1}{W} \frac{dW_{эм}}{d\alpha}$$

## ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

- **Успокоитель** предназначается для убыстрения процесса затухания механических колебаний подвижной части

$$M_y = P \frac{d\alpha}{dt}$$

где  $P$  – коэффициент успокоения,  $d\alpha/dt$  – угловая скорость перемещения подвижной части.

- Наиболее распространены воздушные, жидкостные и магнитоиндукционные успокоители. Электромагнитные приборы по точности делятся на *восемь классов*: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.
- По принципу преобразования ЭМП делятся на несколько групп (систем), основные из которых: **магнитоэлектрическая (МЭ), электромагнитная (ЭМ), электродинамическая (ЭД), электростатическая (ЭС).**

# Магнитоэлектрические приборы

- В магнитоэлектрических приборах (МЭП) узел создания вращающего момента состоит из сильного постоянного магнита и лёгкой подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток. Катушка в форме прямоугольной рамки помещена в кольцевом зазоре между полюсными наконечниками и цилиндрическим сердечником, то есть в радиальном магнитном поле
- Принцип работы МЭП заключается во взаимодействии поля постоянного магнита с проводником, по которому протекает измеряемый ток.

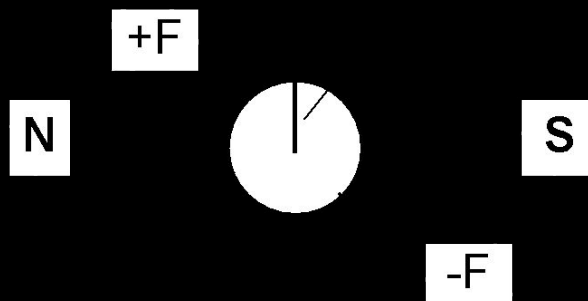
$$M_B = \frac{dW}{d\alpha} = BnsI$$

где  $B$  – индукция в зазоре,  $n$  – число витков катушки,  $S$  – площадь обеих сторон катушки, обращённых к полюсным наконечникам.

$$\alpha = \frac{Bns}{W} I = S_i \cdot I$$



## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ



## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

- Коэффициент успокоения

$$P = -(Bns)^2 / R_{\Sigma}$$

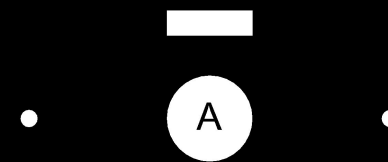
- Для увеличения  $P$  нужно уменьшить  $R_{\Sigma}$ . Если катушка имеет алюминиевого каркаса, являющийся короткозамкнутым витком, тогда

$$P = -B^2 s^2 / R_{кар}$$

- Достоинства МЭП – высокая чувствительность (до А), высокая точность (до 0,05), малое потребление от измеряемой цепи ( Вт).
- Недостатки – температурная погрешность, сравнительная сложность изготовления и ремонта, недопустимость перегрузок.
- МЭП находят применение в качестве амперметров, вольтметров и гальванометров, а с преобразователями переменного тока в постоянный ток и для измерения переменного тока и напряжения.

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

- **Амперметры.** Так как обычно обмотка подвижной катушки состоит из тонкого провода, то непосредственно МЭП можно применять только в качестве миллиамперметра и микроамперметра.
- Для измерения больших токов к нему подсоединяется электрический шунт внутренний или внешний, для токов больших 50 А. Переносные приборы часто снабжаются внутренними многопредельными шунтами или внешними магазинами шунтов.
- Выбор шунта для данного прибора определяется заданным расширением предела измерения – и внутренним сопротивлением магнитоэлектрического прибора – . Используя несложные соотношения, получим:

$$R_{ш} = \frac{I_n R_n}{I_{ш}} = \frac{R_n}{(m-1)}$$


- Применение шунта приводит к увеличению общей погрешности МЭП из-за погрешности изготовления шунта и разных температурных коэффициентов сопротивления шунта и катушки прибора.

## МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

- **Вольтметры.** При параллельном подключении МЭП к участку электрической цепи можно измерить напряжение на нём. В этом случае уравнение шкалы прибора будет иметь вид:

$$\alpha = \frac{Bns}{WR_V} U = S_U U$$

где  $S_U$  – чувствительность вольтметра по напряжению.

- Для измерения больших напряжений необходимо включать добавочные сопротивления  $R_d = R_n(m-1)$  последовательно с  $R_n$



- **Гальванометры.** Особо чувствительные МЭП для измерения тока, напряжения и заряда называются гальванометрами. Класс точности им не присваивается. Гальванометры чаще всего используются в нуль-индикаторах. Для этого выпускаются гальванометры с двусторонней шкалой, то есть с нулём посередине.

# Электромагнитные приборы

- Узел создания вращающего момента у электромагнитных приборов (ЭМП) них состоит из плоской или круглой катушки, по которой протекает измеряемый ток, и сердечника, закреплённого на оси указателя шкалы прибора



- Принцип действия ЭМП заключается во взаимодействии магнитного поля неподвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток, с подвижным ферромагнитным сердечником.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

$$M_B = 0,5 I^2 \frac{dL}{d\alpha} \quad \alpha = \frac{1}{2W} \frac{\partial L}{\partial \alpha} I^2 = S_I I^2$$

- Отклонение стрелки прибора пропорционально квадрату измеряемого тока. Градуировка прибора на постоянном токе соответствует среднеквадратическому (действующему) значению переменного тока.
- Достоинства ЭМП – простота и надёжность, возможность измерения как постоянного, так и переменного токов.
- Недостатки – малая чувствительность, значительное потребление мощности (до 1 Вт), нелинейность шкалы (в начале сжата, в конце растянута), значительная погрешность, много влияющих величин (внешние температура и магнитное поле, частота переменного тока).
- Значительная погрешность обусловлена наличием ферромагнитного сердечника (вихревые токи, магнитный гистерезис).
- ЭМП благодаря своей простоте и надёжности широко применяются для измерений токов и напряжений в сильных цепях постоянного и переменного токов промышленной частоты (50 и 400 Гц) в виде щитовых приборов различных размеров и классов – 1,5 и 2,5. Имеются приборы классов 1,0 и 1,5 для работы на фиксированных частотах 50, 200, 800, 1000, 1500 Гц.

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПРИБОРЫ

- **Амперметры.** Катушки приборов изготавливают из медного провода, рассчитанного на номинальный ток (например, 10 А). Щитовые приборы выпускают на токи 0,1...500 А, а для расширения пределов измерения применяют измерительные трансформаторы тока с классами точности 0,05...1,0 и нормированным сопротивлением во вторичной цепи (0,2...2) Ом. Основная рабочая частота – 50 Гц, но есть приборы на 400 и 1000 Гц. Допускают первичные токи от 5 А до 15 кА. Сопротивления амперметров малы, поэтому нормальным режимом работы для трансформатора тока является режим короткого замыкания.
- **Вольтметры.** Катушку изготавливают из тонкого провода с большим числом витков. Уравнение шкалы для электромагнитного вольтметра имеет такой вид

$$\alpha = \frac{1}{2WR^2} \frac{dL}{d\alpha} U^2$$

- Щитовые вольтметры непосредственного включения выпускают со шкалами от 7,5 до 250 В, а с – на 450, 600 и 750 В. Класс точности 1,5. Для измерения высоких (до 15 кВ) напряжений используют измерительные трансформаторы напряжения. Так как сопротивления вольтметров достаточно велики, то измерительные трансформаторы напряжения работают практически в режиме холостого хода.

# Электродинамические приборы

- Узел, создающий вращающий момент, состоит из неподвижной катушки и подвижной, помещённой внутри неподвижной
  
- Принцип действия электродинамических приборов (ЭДП) заключается во взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек, по которым протекает измеряемый ток.

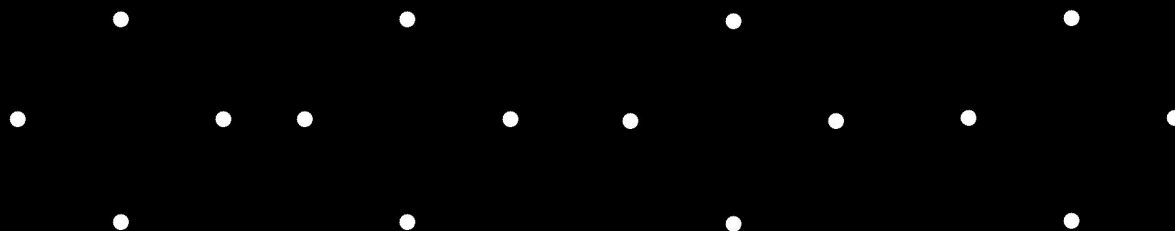
$$M_B = \frac{dM_{1.2}}{d\alpha} I_1 I_2,$$

$$\alpha = (1/W) I_1 I_2 (dM_{1.2} / d\alpha)$$



## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

- Показания ЭМП пропорциональны произведению токов, протекающих по катушкам, градуировка на постоянном токе верна и для переменного тока.
- **Достоинства** ЭДП □ возможность перемножения токов, то есть можно измерять мощность; малая погрешность, так как в конструкции нет ферромагнетиков.
- **Недостатки** малая чувствительность; значительное потребление энергии; сравнительная сложность конструкции; нелинейность шкалы; недопустимость перегрузки; влияние внешней температуры, частоты измеряемого тока и внешних магнитных полей. Приборы также часто делают астатическими.
- Выпускается много щитовых и переносных амперметров, вольтметров и ваттметров электродинамической системы для применения в цепях постоянного и переменного токов с частотой 50, 400, 1000, 2000, и 3000 Гц. Класс точности щитовых приборов □ 1,5; а переносных □ 0,2; 0,5 и 1,0.



## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

- **Амперметры.** Для измерения тока катушки соединяют параллельно или последовательно, при этом по ним протекает один и тот же ток. Уравнение шкалы для амперметра имеет вид:

$$\alpha = (1/W) I^2 (dM_{1.2} / d\alpha) = S_I I^2$$

где  $S_I$  – чувствительность по току.

- Щитовые приборы непосредственного включения выпускаются с пределами 1...200 А, а переносные приборы имеют пределы 5 мА...10 А.
- Для расширения пределов измерений применяют измерительные трансформаторы тока.
- **Вольтметры.** В вольтметрах обе катушки соединяют последовательно. Уравнение шкалы в этом случае имеет вид:

$$\alpha = \frac{1}{WR_k^2} \frac{dM_{1.2}}{d\alpha} U^2 = S_u U^2$$

где  $S_u$  – чувствительность по напряжению, а  $R_k$  – сопротивление катушки

- Для расширения пределов измерения напряжения применяют добавочные сопротивления  $R_d$ . В этом случае в формулу вращающего момента вместо  $R_k$  нужно подставить  $(R_k + R_d)$ .

## ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

- При измерении переменного напряжения в цепи действует полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R_k^2 + X_k^2}$$

где  $R_k$  и  $X_k$  – активная и реактивная составляющие полного сопротивления катушек. На  $F > 500$  Гц реактивная составляющая проявляется довольно заметно и градуировка шкалы нарушается.

- Щитовые приборы непосредственного включения выпускаются со шкалами до 450 В, переносные от 7,5 до 600 В. Для расширения пределов измерения до 30 кВ применяют измерительные трансформаторы напряжения.
- **Ваттметры.** При измерении мощности одна катушка включается параллельно, а другая последовательно с нагрузкой. Уравнения шкалы ваттметра для постоянного и переменного тока имеют вид:

$$\alpha = \frac{1}{WR_K} \frac{dM}{d\alpha} 1.2 IU = S_W P$$

$$\alpha = \frac{1}{WR_K} \frac{dM}{d\alpha} 1.2 UI \cos \varphi = S_W P \cos \varphi$$

где  $S_W$  – чувствительность по мощности,  $P$  – полная мощность.

- Щитовые приборы имеют пределы 15...3000 Вт, а переносные до 1,5 кВт.

# Ферродинамические приборы

- Это разновидность ЭДП с тем отличием, что неподвижные катушки имеют ферромагнитные сердечники. Это увеличивает вращающий момент (повышает чувствительность), обеспечивает защиту от внешних цепей, но приводит к увеличению погрешности прибора.

# Электростатические приборы

- Принцип действия электростатических приборов (ЭСП) заключается во взаимодействии двух заряженных электрически тел.
- Конструктивно они выполняются в виде неподвижной и подвижной пластин, к которым подводится измеряемое напряжение

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

# Электростатические приборы

- Электростатические приборы являются вольтметрами и киловольтметрами, пригодными для измерения постоянного и переменного напряжений.
- Шкала, градуированная на постоянном токе, справедлива для среднеквадратического значения напряжения любой формы. Изменением формы пластин можно существенно линеаризовать шкалу прибора.
- **Достоинства** ЭСП большие пределы измерений (до 1 МВ); при измерении напряжения постоянного тока входное сопротивление стремится к бесконечности; широкий диапазон частот.
- **Недостатки** – малая чувствительность; относительно малая надёжность; нелинейность шкалы; влияние температуры и внешнего электрического поля, для уменьшения которого применяют экранирование.
- ЭСП выполняют в виде щитовых и переносных вольтметров для применения в цепях постоянного и переменного токов с частотой до 30 МГц. Ограничение по частоте обусловлено резонансом входной цепи. Щитовые приборы выполняют со шкалами от 30 до 3000 В класса 1,0 и 1,5 на частоты до 1 МГц. Переносные – от 30 до 3000 В класса 0,5; 1,0 и 1,5 и частоты до 30 МГц.
- Выпускаются высоковольтные вольтметры на 25...75, 100 и 300 кВ класса 1,0 и 1,5 и частоты от 50 кГц до 5 МГц.

## ПЕРЕЧЕНЬ ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. М.К. Чмых. Статистическая теория погрешностей измерения. Методы статистической обработки: Методические указания к выполнению лабораторных работ и дипломных проектов для студентов специальности 2301 – «Радиотехника» [Текст]. / Сост. М.К. Чмых, КрПИ, Красноярск, 1993. 26 с.
2. Измерения в электронике: Справочник / В. А. Кузнецов, В. А. Долгов, В. М. Коневских и др.; Под ред. В. А. Кузнецова. М.: Энергоатомиздат, 1987. 512 с.
3. Пестряков В. Б. Фазовые радиотехнические системы (основы статистической теории). М.: Советское радио, 1968. 468 с.
4. Кушнир Ф. В. Электрорадиоизмерения: Учебное пособие для вузов. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. 320 с.
5. Винокуров В. И., Каплин С. И., Петелин И. Г. Электрорадиоизмерения: Учеб. пособие для радиотехн. спец. Вузов / Под ред. В. И. Винокурова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1986. 351с.
6. Мирский Г. Я. Электронные измерения. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1986. 440 с.
7. Чмых М. К. Цифровая фазометрия. М.: Радио и связь, 1993. 184 с.
8. Сапельников В. М., Кравченко С. А., Чмых М. К. Проблемы воспроизведения смещаемых во времени электрических сигналов и их метрологическое обеспечение. Уфа. 2000. 196 с.
9. А. с. № 789852 СССР. Цифровой измеритель частоты / С. В. Чепурных, М. К. Чмых. 1980. Бюл. № 47.
10. Чмых М. К. Весовой метод повышения точности и помехоустойчивости цифровых измерителей частоты / Автометрия. 1979. № 4. С. 135–137.