



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 α – 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

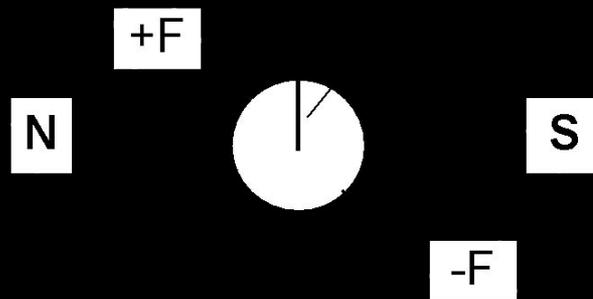
- В магнитоэлектрических приборах (МЭП) узел создания вращающего момента состоит из сильного постоянного магнита и лёгкой подвижной катушки, по которой протекает измеряемый ток. Катушка в форме прямоугольной рамки помещена в кольцевом зазоре между полюсными наконечниками и цилиндрическим сердечником, 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.

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

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ



МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

- Коэффициент успокоения

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

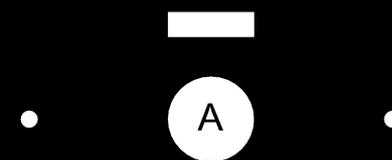
- Для увеличения P нужно уменьшить R_{Σ} . Если катушка имеет алюминиевого каркаса, являющийся короткозамкнутым витком, тогда

$$P = -B^2 s^2 / R_{кар}$$

- 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

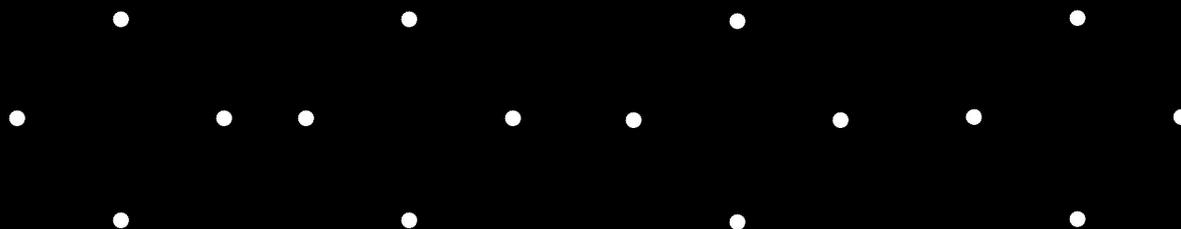
- Принцип действия электродинамических приборов (ЭДП) заключается во взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек, по которым протекает измеряемый ток.

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

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

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.