

примет вид:

$$\max|\Delta x| = 2K_{ном} \cdot x_m \cdot \sin \varphi / 2.$$

Если $x(t)$ представляет собой сумму N гармонических составляющих $x_i(t)$, то максимально возможная погрешность также определится суммой погрешностей гармоник:

$$\max|\Delta x| \leq \sum_{i=1}^N 2K_{ном} \cdot x_{mi} \cdot \sin \frac{\varphi_i}{2}. \quad (12.18)$$

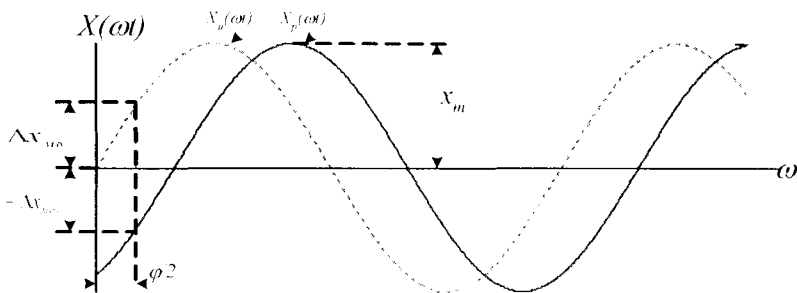


Рис. 12.6. Графики реакции идеального (пунктирная линия) и реального (сплошная линия) звеньев

В общем случае на динамическую погрешность влияет как АЧХ, так и ФЧХ каждого звена. Точное определение суммарной погрешности – сложная задача. В качестве оценки сверху принимают сумму двух составляющих. Но нужно помнить, что это достаточно грубая оценка.

ЛЕКЦИЯ 13. СРЕДСТВА ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. МЕРЫ

Меры разделяют на *эталоны*, *образцовые* и *рабочие*. Образцовые меры предназначены для поверки и градуировки рабочих средств измерений. По точности воспроизведения физической величины их разделяют на три

разряда, причем, наименьшая погрешность воспроизведения у меры первого разряда.

Рабочие меры служат для измерений. По количеству воспроизводимых мер их делят на *однозначные, многозначные и наборы мер*.

К *однозначным мерам* относят измерительные катушки сопротивления, катушки индуктивности и взаимной индуктивности, измерительные конденсаторы постоянной емкости, нормальные элементы и стабилизированные источники напряжения. Рассмотрим их более подробно.

Измерительные катушки сопротивления выполняют на номинальные значения 10^n Ом , где n – целое (от 10^{-5} до 10^{10}) Ом. Класс точности может изменяться в пределах от 0,05 до 0,1. Обмотка катушки выполняется из манганина, имеющего малый температурный коэффициент и высокую стабильность свойств.

Катушка имеет два токовых вывода для включения в цепь и два потенциальных – для измерения сопротивления. При работе в цепи переменного тока необходимо учитывать собственную ёмкость C и индуктивность L (см. рис. 13.1). Степень реактивности катушки характеризуют постоянной времени

$$\tau = (L/R) - RC,$$

где R – сопротивление провода катушки постоянному току.

Измерительные катушки индуктивности и взаимной индуктивности выполняют из проволоки, намотанной на каркас, на номинальные значения от 10^{-6} до 1 Гн . Класс точности может иметь значения от 0,05 до 0,5. Верхний предел частоты, на которой можно применять измерительные катушки индуктивности, равен 100 кГц . Эквивалентная схема катушки индуктивности аналогична схеме на рис. 13.1.

Катушки взаимной индуктивности имеют две обмотки, размещенные

на общем каркасе.

Измерительные конденсаторы выполняют с воздушной и слюдяной изоляцией. В цепях высокого напряжения применяют газонаполненные конденсаторы. Емкость измерительных конденсаторов не превышает 10^4 пФ. Класс точности ограничен диапазоном от 0,005 до 1.

Нормальные элементы – специальные химические источники электрической энергии, Э.Д.С. которых известна с большей точностью. Например известно, что Э.Д.С. нормального источника при температуре 20^0 С равна $(1,0185 \div 1,0187)$ В. Поэтому класс точности нормальных элементов очень высок и лежит в пределах от 0,0002 до 0,02.

Стабилизированные источники напряжения часто применяются в качестве меры напряжения.

К многозначным мерам относят измерительные генераторы, калибраторы напряжения, тока, фазового сдвига, измерительные конденсаторы переменной емкости, вариометры, магазины сопротивлений, емкости и индуктивности. Рассмотрим их более подробно.

Измерительные генераторы – это источники переменного тока и напряжения, форма которых заранее известна, а частота, амплитуда и другие параметры могут регулироваться и отсчитываться с заданной точностью. Выпускаются генераторы синусоидальных сигналов, генераторы шума, импульсных сигналов и сигналов специальной формы. Диапазон частот генераторов может находиться в пределах от 0,01 до 10^{10} Гц. Погрешность установки частоты $\pm (0,1 \div 3)\%$.

Калибраторы – это стабилизированные источники напряжения или тока, позволяющие получать на выходе ряд калиброванных (точно известных) значений сигналов. Погрешность установки достигает значений $\pm 5 \cdot 10^{-3}\%$.

Магазины сопротивлений, емкостей и индуктивностей позволяют устанавливать необходимое значение величины с помощью переключателей.

Магазины сопротивлений воспроизводят величины от 10^{-2} до 10^{10} Ом. Класс точности от 0,005 до 1.

Магазины индуктивностей имеют диапазон старшей декады от 0,001 до 10000 мГн. Число декад от 1 до 5. Класс точности от 0,02 до 1.

Магазины емкостей имеют диапазон от 10^{-3} до 10^9 пФ. Класс точности от 0,005 до 1.

2. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Разработано большое количество преобразователей, отличающихся функциональным назначением, классом обрабатываемых сигналов, принципом построения и работы (см. рис. 11.1). Чаще других применяются *масштабные* и *электромеханические* преобразователи.

2.1. Масштабные преобразователи.

Масштабным называют измерительный преобразователь, предназначенный для изменения величины в заданное число раз. К ним относят шунты, делители напряжения, измерительные усилители, измерительные трансформаторы.

Шунты применяются для уменьшения силы тока в заданное число раз. Такая задача возникает, когда диапазон показаний амперметра меньше диапазона изменения измеряемого тока.

Шунт – это резистор, включаемый параллельно амперметру (рис. 13.2).

Если

$$R_{ш} = R_A / (n - 1),$$

то ток I_2 в n раз меньше тока I_1 . Здесь R_A – сопротивление амперметра; $n = I_1 / I_2$ – коэффициент шунтирования.

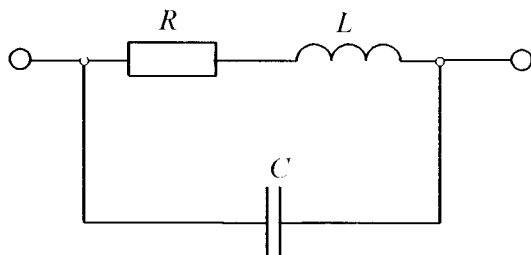


Рис. 13.1. Схема замещения измерительной катушки сопротивлением

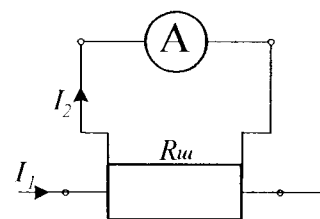


Рис.13.2. Схема включения шунта

Шунты могут состоять из нескольких резисторов, или иметь несколько отводов. Это позволяет изменять коэффициент шунтирования. Размещаются шунты в корпусе прибора или снаружи. Применяются, в основном, в цепях постоянного тока в магнитоэлектрических приборах. Классы точности от 0,02 до 0,5.

Делители напряжения применяются для уменьшения напряжения в заданное число раз. В зависимости от рода тока, элементы делителя выполняют в виде чисто активного сопротивления, емкостного или индуктивного сопротивления. Серийно выпускаемые делители имеют нормированные коэффициенты деления и классы точности от 0,0005 до 0,01.

Для увеличения верхнего предела вольтметра с внутренним сопротивлением R_V , последовательно с ним включают добавочный резистор R_D , причем

$$R_D = R_V \left(\frac{U_X}{U_V} - 1 \right),$$

где U_X – измеряемое напряжение; U_V – падение напряжения на вольтметре.

Класс точности добавочных резисторов изменяется от 0,01 до 1. Материал – манганин. Номинальный ток от 0,5 до 30 мА.

Измерительные усилители предназначены для расширения пределов измерения в сторону малых сигналов. По диапазону частот измерительные

усилители разделяют на усилители:

- постоянного тока,
- низкочастотные ($20 \text{ Гц} \div 200 \text{ кГц}$),
- высокочастотные – до 250 МГц ,
- селективные (узкополосные).

Электронные измерительные усилители позволяют измерять сигналы от $0,1 \text{ мВ}$ и $0,3 \text{ мкА}$ с погрешностью от $0,1$ до 1% . При меньших значениях сигналов применяют фотогальванические усилители. Серийные измерительные усилители имеют унифицированный номинальный выходной сигнал 10 В или 5 мА .

Измерительные трансформаторы переменного тока и напряжения используют для преобразования больших переменных токов и напряжений в относительно малые, допустимые для измерений приборами с малыми пределами измерения (например, 5 А , 100 В). Кроме того, применением трансформаторов повышается безопасность операторов, так как приборы включаются в заземленную цепь низкого напряжения (рис. 13.3). Измерительные трансформаторы разделяют на трансформаторы напряжения и трансформаторы тока.

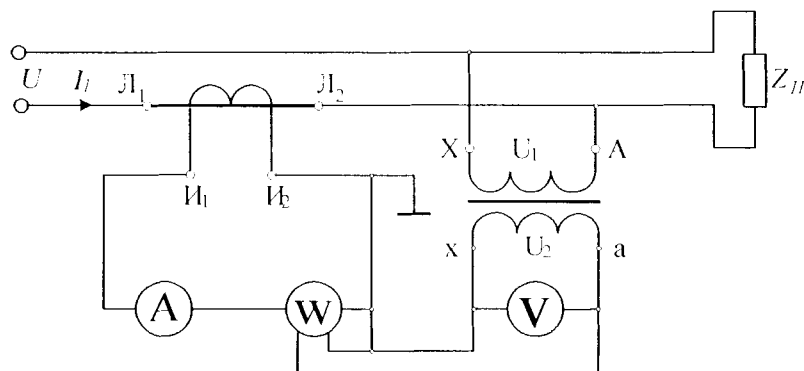


Рис. 13.3. Схема включения амперметра, вольтметра и ваттметра в однофазную цепь через измерительные трансформаторы

Трансформаторы напряжения используют для включения вольтметров, частотомеров, параллельных цепей ваттметров, счетчиков, фазометров и др. приборов. Схема включения амперметра, вольтметра и ваттметра в

однофазную цепь через измерительные трансформаторы приведена на рис. 13.3. Для правильного включения трансформаторов и измерительных приборов зажимы трансформаторов обозначают, как показано на рис. 13.3.

В трансформаторах тока $\varpi_1 < \varpi_2$. Поэтому ток первичной обмотки $I_1 > I_2$. Первичная обмотка может состоять из одного витка, в виде шины, проходящей через окно сердечника.

В трансформаторах напряжения $\varpi_1 > \varpi_2$. Поэтому $U_1 > U_2$. Трансформаторы напряжения, как правило, понижающие.

Чтобы определить измеряемые величины, необходимо показания приборов умножить на коэффициенты трансформации $K_{IH} = I_{1H} / I_{2H}$ и $K_{UH} = U_{1H} / U_{2H}$. Измерительные приборы, работающие в комплекте с измерительными трансформаторами, градуируют непосредственно в единицах первичных величин.

Коэффициенты трансформации реальных трансформаторов K_I и K_U зависят от значения токов и напряжений, частоты, характера нагрузки. Это приводит к погрешности измерений токов – Δ_I и напряжений – Δ_U . У измерительных трансформаторов имеется еще угловая погрешность, обусловленная неточностью передачи фазы вторичной величине. Это оказывает влияние на показания приборов, отклонение подвижной части которых зависит от фазы измеряемой величины.

2.2. Электромеханические преобразователи

Электромеханические преобразователи преобразуют электрическую энергию входного сигнала в механическую энергию перемещения указателя. Они состоят из подвижной и неподвижной частей и называются *измерительными механизмами*.

Поворот подвижной части измерительного механизма осуществляется под действием момента, зависящего от измеряемой величины x и от угла по-

ворота подвижной части механизма – α . Этот момент называется *вращающим* и обозначается индексом M .

$$M = F(x, \alpha).$$

При повороте подвижной части на угол $d\alpha$ изменяются механическая энергия dA и энергия электромагнитного поля измерительного механизма – $dW_{ЭМ}$, причем $dW_{ЭМ} = dA$. Так как при угловом перемещении $dA = M \cdot d\alpha$, то

$$M = dW_{ЭМ} / d\alpha. \quad (13.1)$$

Чтобы угол поворота α зависел только от измеряемой величины, на подвижную часть должен воздействовать противодействующий момент $M_{пр}$, также зависящий от угла поворота α , т. е.

$$M_{пр} = f(\alpha).$$

При некотором угле поворота наступает равенство моментов, т.е. $M + M_{пр} = 0$, или $M = -M_{пр}$.

По способу создания противодействующего момента различают механизмы с механическим и с электрическим противодействующим моментом. В измерительных механизмах первой группы противодействующий момент создается спиральными пружинами, причём:

$$M_{пр} = -W_{\gamma\theta} \cdot \alpha, \quad (13.2)$$

где $W_{\gamma\theta}$ – удельный противодействующий момент пружины.

Кроме создания противодействующего момента упругие элементы используют в качестве токопровода к подвижной части измерительного механизма.

В измерительных механизмах второй группы (логоритмических) противодействующий момент создается так же, как и вращающий, но зависит от угла поворота.

Оценим свойства измерительных механизмов по их структурной схе-

ме. Измерительный механизм имеет схему прямого преобразования с двумя звеньями (рис. 13.4). В звене Π_1 происходит преобразование сигналов по формуле (12.1). Преобразовательная функция звена Π_1 определяется типом механизма. Это значит, что может быть не менее шести различных функций звена Π_1 .

Звено Π_2 одинаково для всех механизмов. В нем вращающий момент преобразуется в угол отклонения подвижной части механизма – α . Передаточная функция Π_2 определяется дифференциальным уравнением, описывающим движение подвижной части механизма:

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = M + M_p + M_{np}, \quad (13.3)$$

где J – коэффициент инерции подвижной части, $J \frac{d^2 \alpha}{dt^2}$ – момент сил инерции, $M_p = -P \frac{d\alpha}{dt}$ – момент успокоения, P – коэффициент успокоения.

Если противодействующий момент создается упругими элементами, то выражение (13.3) принимает вид

$$J \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + P \frac{d\alpha}{dt} + W_{y0} \cdot \alpha = M. \quad (13.4)$$

С учетом (13.3) и (13.4) коэффициент передачи звена Π_2 имеет вид:

$$K_2(j\omega) = \alpha(j\omega) / M(j\omega) = \frac{1}{J(j\omega^2) + P(j\omega) + W_{y0}}.$$

После преобразований получают АЧХ звена Π_2 :

$$|K_2(j\omega)| = 1 / W_{y0} \sqrt{(1 - g^2)^2 + 4\beta^2 g^2}, \quad (13.5)$$

где $g = \omega / \omega_0$; ω – частота изменения вращающего момента, $\omega_0 = \sqrt{W_{y0} / J}$ – частота собственных колебаний подвижной части механизма, $\beta = P / (2\sqrt{J \cdot W_{y0}})$ – степень успокоения подвижной части.

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

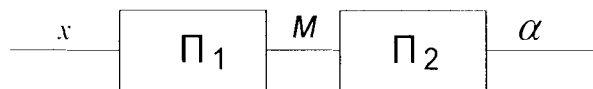


Рис.13.4. Структурная схема измерительного механизма

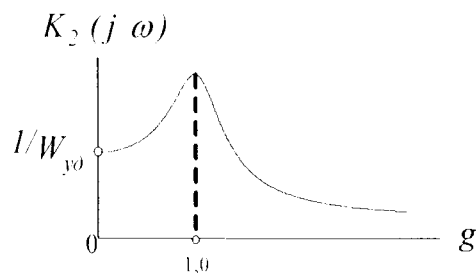


Рис.13.5. График АЧХ второго звена измерительного механизма

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:

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

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