

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ИЗМЕРЕНИЯХ

**КЛАССИФИКАЦИЯ
ИЗМЕРЕНИЙ**

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения могут быть разделены по ряду признаков: виду измеряемой величины, способу получения результатов, характеру изменений измеряемой величины.

По виду измеряемой величины различают следующие измерения:

- *механические*, охватывающие измерения массы, силы, скорости (линейной и угловой), частоты вращения, ускорения, момента вращения, давления, механического напряжения, расхода протекающего вещества, уровня раздела сред и т. д.;

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

- *тепловые*, включающие измерения температуры, ее градиентов, тепловых потоков и т. д.;
- *линейно-угловые*, включающие измерения линейных размеров профилей, углов, дуг и т. п.;
- *электрические*, охватывающие измерения силы тока, напряжения, мощности, энергии, сдвига фаз, сопротивления и т. п.; разновидностью электрических являются радиотехнические измерения, относящиеся к области высоких частот;

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

- *виброакустические*, включающие в себя измерения уровней виброускорений и воздушного шума;
- *физико-химические* измерения состава и свойств веществ и смесей веществ; сюда относятся определение содержания газов в смесях, анализ, жидких растворов, содержание влаги в газах и жидкостях и т. п.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Величины, измеряемые в ходе теплотехнических испытаний холодильного оборудования, в приведенной классификации сводят в одну расширенную группу. В эту группу входят тепловые измерения и часть механических, такие, как измерения давления, расхода и количества протекающих сред, уровня раздела сред.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

По способу получения результатов различают измерения прямые и косвенные.

- *Прямыми* называют измерения, результаты которых получают непосредственно из наблюдений за показаниями приборов. Так, измерения температуры термометрами, давления — манометрами, расхода — ротаметрами являются прямыми.
- *Косвенными* называют измерения, результаты которых получают расчетным путем на основании двух или нескольких прямых измерений. Так, величина холодопроизводительности машины является косвенно измеренной.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Например, холодопроизводительность определяют по формуле

$$Q = m_{\text{ТН}} c_{\text{ТН}} (t_{\text{ТН1}} - t_{\text{ТН2}})$$

где Q — искомая холодопроизводительность, Вт; $m_{\text{ТН}}$ — массовый расход теплоносителя, кг/с; $c_{\text{ТН}}$ — удельная теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг °С); $t_{\text{ТН1}}$ и $t_{\text{ТН2}}$ — температуры на входе в испаритель и на выходе из него, °С.

Величины $m_{\text{ТН}}$, $t_{\text{ТН1}}$ и $t_{\text{ТН2}}$ являются результатами прямых измерений расхода и

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

По характеру изменений измеряемой величины различают измерения медленноменяющихся и быстроменяющихся величин.

В холодильной технике, которая в основном имеет дело с объектами, обладающими значительной тепловой ёмкостью, а, следовательно, и инерцией, основной объём измерений падает на установившиеся режимы с длительностью несколько минут и даже часов. Величины, которые могут находиться в установившемся состоянии столь длительное время и изменения которых от режима к режиму происходят за время тех же порядков, относят к медленноменяющимся.

КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Существуют величины, изменения которых происходят периодически или непериодически за относительно малые промежутки времени, исчисляемые сотыми и тысячными долями секунды. К таким быстроменяющимся величинам относятся давление и температура в полостях сжатия компрессоров, пульсации давления в полостях и трубопроводах машин, перемещение элементов компрессоров (например, клапанных пластин), значения периодически изменяющегося момента вращения на валу компрессора, изменение частоты вращения и тока в цепи двигателя компрессора при его запуске и т. д.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Средство измерения — это техническое устройство, предназначенное для выполнения измерений и имеющее нормированные метрологические характеристики.

Средства измерений подразделяются на меры, приборы и преобразователи. В практике находят применение также измерительные системы.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Мера — это средство измерений, предназначенное для воспроизведения физической величины заданного размера. К мерам относят такие средства, как гири (меры массы), резисторы (меры электрического сопротивления), сосуды (меры вместимости) и др.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИИ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Измерительный прибор — это средство измерений, предназначенное для выработки измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительные приборы, которые непосредственно воспринимают измеряемую величину, называются *приборами прямого, или непосредственного, отсчета.*

Измерительные приборы, воспринимающие измеряемую величину, предварительно преобразованную в другую величину, называются

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Различают измерительные приборы аналоговые и цифровые.

В *аналоговом* приборе отсчет показаний производят по шкале, отражающей непрерывную зависимость между измеряемой величиной и перемещением отсчетного устройства.

В *цифровом* приборе измерительная информация выдается с помощью цифрового отсчетного устройства.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Измерительные приборы могут быть показывающими, регистрирующими и комбинированными (показывающими и регистрирующими). Регистрация показаний может выполняться с помощью самопишущих или печатающих приборов.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИИ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Измерительный преобразователь — это средство измерений, предназначенное для выработки измерительной информации в форме, удобной для передачи и обработки. Измерительные преобразователи подразделяются на первичные, промежуточные и передающие.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Первичным называют преобразователь, к которому подведена измеряемая величина. Иногда эти преобразователи называют датчиками.

Промежуточные и передающие преобразователи соответственно воспринимают сигналы, выработанные первичным преобразователем, и обеспечивают дистанционную передачу их.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Преобразователи бывают *аналоговыми*, если входной и выходной сигналы воспроизводятся в аналоговой форме, *цифровыми* (дискретными), если входной и выходной сигналы представляют собой последовательности импульсов (коды), а также *аналого-цифровыми* (вход аналоговый, выход цифровой) и *цифроаналоговыми* (вход цифровой, выход аналоговый).

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Действующая в России государственная система приборов (ГСП) предусматривает стандартизованные электрические и пневматические сигналы.

В частности, аналоговые электрические сигналы встречаются в следующих основных формах:

в виде изменения взаимной индукции в пределах

0—10 мГ или 10—0—10 мГ;

в виде сигнала постоянного тока с пределами 0—5; 0—20 и 4—20 мА;

в виде сигнала напряжения постоянного тока с пределами 0—10 и 0—20 В.

Наиболее распространенным стандартным пневматическим сигналом является

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИИ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Измерительная система — это совокупность средств измерений, вспомогательных устройств и каналов связи, предназначенная для выработки, передачи и обработки измерительной информации.

К таким системам относятся, в частности, измерительно-вычислительные комплексы, осуществляющие автоматический сбор и обработку экспериментальных данных.

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

Градуировочная характеристика, или статическая функция преобразования, — зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерения в установившемся состоянии, представляемая в табличной, графической или аналитической форме.

Начальное и конечное значения отсчетного устройства (шкалы или цифрового отсчетного устройства) — наименьшее и наибольшее значения измеряемой величины, указанные на шкале или воспроизводимые цифровым устройством.

Диапазон показаний — область, ограниченная начальным и конечным значениями отсчетного устройства.

Диапазон измерений (преобразований) — область значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаемые погрешности.

Пределы (верхний и нижний) *измерений* — наибольшее и наименьшее значения диапазона измерений.

Абсолютная погрешность — разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины либо разность между значением измеряемой величины, полученной на выходе преобразователя с помощью градуировочной характеристики, и действительным ее значением на входе.

Относительная погрешность — отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины. Может выражаться дробью или в процентах.

Приведенная погрешность — отношение абсолютной погрешности к нормированному значению, например диапазону показаний или измерений.

Динамическая погрешность — составляющая погрешности, равная разности между погрешностью в динамическом режиме (при переменной входной величине) и статической погрешностью, соответствующей значению величины в данный момент времени.

Основная погрешность — погрешность при условиях работы, принятых за нормальные.

Дополнительная погрешность — изменение погрешности, вызванное отклонением одной или нескольких влияющих величин от значений, принятых за нормальные.

Предел допускаемой погрешности — наибольшая погрешность, при которой средство измерений может быть признано годным (понятие применимо для основной и дополнительной погрешностей).

Класс точности — обобщенная характеристика, определяемая пределами допускаемых погрешностей. В общем случае понятие класса точности устанавливается для каждого конкретного средства измерения его технической документацией. Однако в целом ряде случаев класс точности принимают численно равным пределу допускаемой приведенной погрешности относительно диапазона измерений.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИИ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Кроме приведенной классификации средства измерений разделяют по следующим признакам: назначению, виду измеряемой величины, числу пределов измерений.

По назначению средства измерений делятся на рабочие, образцовые и индикаторы.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Рабочие средства измерений в свою очередь разделяют на технические и лабораторные. *Технические* предназначены для измерений в условиях эксплуатации холодильного оборудования, для контроля за ходом технологических процессов, работой систем автоматики, переналадки оборудования и средств автоматизации. Они имеют, как правило, невысокие точностные характеристики. По конструкции технические средства измерений приспособлены для установки на щитах, в шкафах и непосредственно на оборудовании.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИИ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Лабораторные средства измерений предназначены для использования в научно-исследовательской практике, при испытаниях оборудования в стендовых условиях. Отличаются более высокими точностными характеристиками. Конструктивно выполняются обычно в переносном исполнении в основном для установки на лабораторных столах и стойках.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Образцовые средства измерений предназначены для поверки рабочих средств или других менее точных образцовых в условиях специализированных измерительных лабораторий.

По конструкции — это переносные приборы или стационарные установки.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИИ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

По точностным характеристикам они выше остальных средств измерений. В некоторых случаях возникает необходимость использования в научно-исследовательских работах образцовых (по назначению) средств в качестве рабочих. Такая практика допускается. Однако при этом средство измерений считается не образцовым, а рабочим с соответствующей точностной характеристикой.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

Индикаторами называют средства измерения, не имеющие нормированных точностных характеристик и служащие для ориентировочной оценки измеряемой величины.

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

По виду измеряемой величины средства измерений делятся в соответствии с классификацией измеряемых величин.

Название они получают по наименованию измеряемой величины (например, манометр, расходомер, частотомер и т. п.), единицы физической величины (амперметр, вольтметр), либо по характерному признаку своего устройства (например, измерительный мост, термоанемометр).

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КЛАССИФИКАЦИЯ

По числу пределов измерений различают одно-, двух- и многопредельные средства измерений.

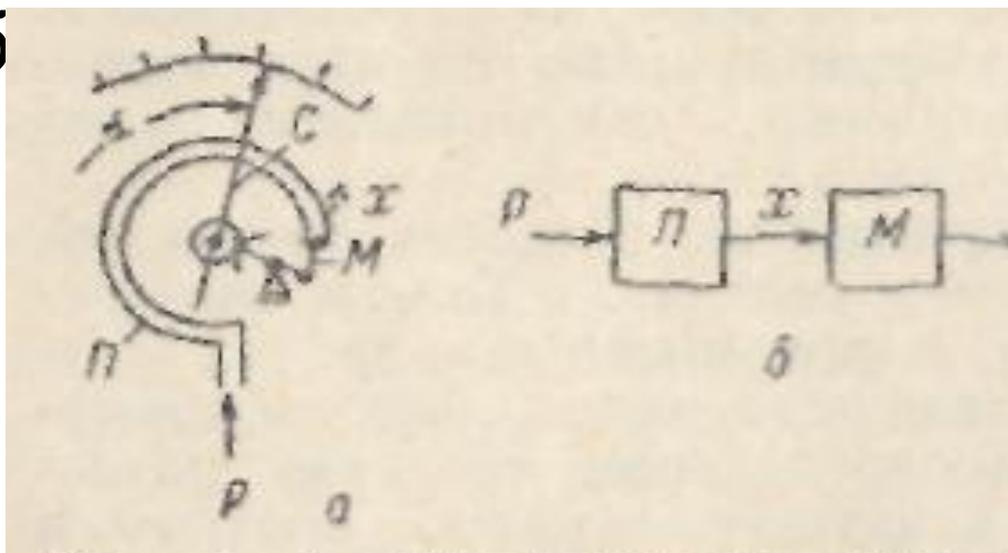
Однопредельные средства позволяют измерить величину, лежащую в интервале между верхним и нижним пределами измерений.

В двух- и многопредельных средствах предусматриваются специальные устройства для переключения пределов, в результате чего расширяется диапазон измерений.

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКИ

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

Любое средство измерения, как и совокупность этих средств, могут рассматриваться как некая измерительная цепь, состоящая из ряда соединенных между собой



з.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

Чувствительным элементом манометра является пружина Бурдона Π , свободный конец которой совершает перемещение x , зависящее от измеряемого давления p . Перемещение x через механизм передачи M , состоящий из тяги, сектора и трипки, сообщается стрелке C , которая, поворачиваясь на угол α , указывает по шкале значение измеряемой величины.

Работа средства измерения характеризуется функцией преобразования, общий вид которой $\alpha = f(p)$.

Для анализа работы манометр можно представить в виде измерительной цепи, состоящей из двух звеньев: пружины Γ и механизма передачи M .

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

Функцию преобразования звеньев можно представить в виде

$$l = f_{\Pi}(p) \quad \text{и} \quad \alpha = f_{\text{М}}(l)$$

а всего средства измерения — в виде

$$\alpha = f_{\text{М}}[f_{\Pi}(p)]$$

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

Функция преобразования является обобщенной характеристикой измерительной цепи или ее элементов, так как связывает между собой входную и выходную величины.

Статическая функция преобразования и ее параметры определяют свойства измерительной цепи или ее элемента в установившемся состоянии, т. е. при неизменном значении входной величины.

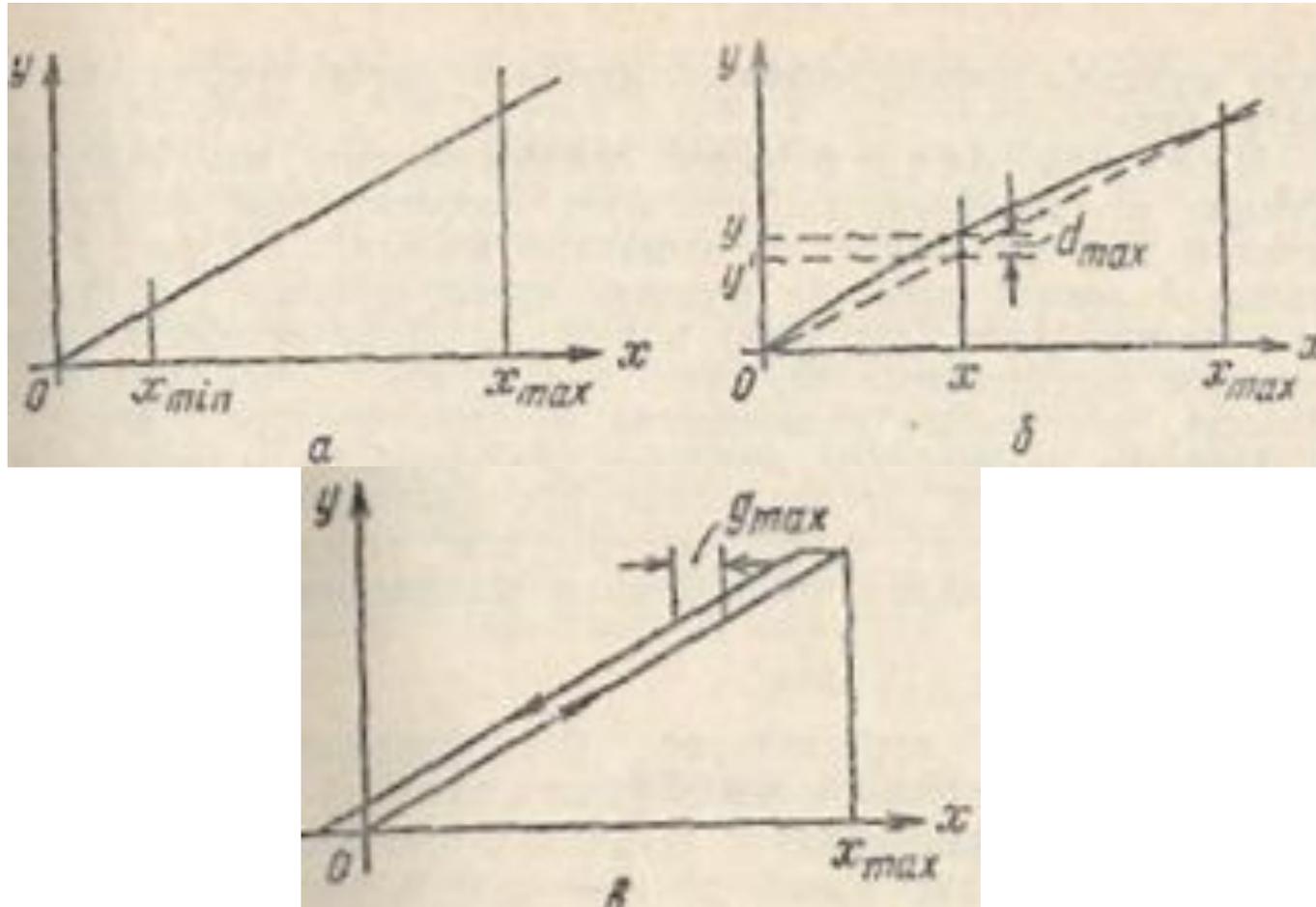
ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

В условиях меняющейся входной величины проявляются динамические свойства средства измерения, которые определяют поведение цепи или ее элементов в переходных режимах, а также при воздействии на вход переменных, в частном случае периодических воздействий. Эти свойства описываются динамическими характеристиками.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В настоящее время нет общепринятого перечня статических характеристик. Целесообразно рассматривать идеальную статическую функцию преобразования и ее параметры, а также дефекты этой функции, вызывающие отклонения от идеальной.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Статические характеристики (функции преобразования)
средств измерения:

a — идеальная линейная; $б$ — нелинейная; $в$ — с гистерезисом

В качестве идеальной рассмотрим линейную функцию преобразования

$$y = kx$$

график которой показан на рис. а.

Здесь x — входная величина, y — выходная. Эту функцию характеризуют чувствительность и диапазон преобразования.

Чувствительность, или *коэффициент преобразования* k , показывает, какое изменение выходного сигнала вызывается изменением входного на одну единицу. Для линейной функции

$$k = \Delta y / \Delta x$$

Диапазон преобразования — это область входных величин, в пределах которой элемент или измерительная цепь обеспечивают реализацию функции преобразования.

Диапазон ограничен верхним и нижним пределами преобразования x_{\max} и x_{\min} . В частном случае x_{\min} может быть равен нулю. Если функция преобразования заходит и в отрицательную область, то x_{\min} может стать меньше нуля. Применительно к измерительным приборам величины x_{\min} и x_{\max} называют нижним и верхним пределами измерений, а область между ними — *диапазон измерений*.

В общем случае функция преобразования необязательно проходит через нулевую точку, и тогда ее уравнение имеет вид

$$y = kx + a$$

Из этого уравнения следует, что при нулевом значении входного сигнала $x = 0$ выходной сигнал $y_0 = a$, а нулевому выходному сигналу $y = 0$ соответствует входной $x_0 = -a/k$.

Дефекты статической функции преобразования являются источниками погрешностей средств измерений. К ним относят нелинейность функции преобразования, гистерезис, порог чувствительности, дрейф нуля.

Нелинейность функции преобразования, или отклонение функции от линейной, характеризует несоответствие фактической функции преобразования и идеальной модели. На рис. б сплошной линией показана функция преобразования, а пунктирной — ее идеальная (заданная) модель. Каждому значению входной величины соответствует разность между ними. Чем больше эта разность, тем больше нелинейность функции преобразования.

Принято нелинейность оценивать

приведенным значением, т. е.

отношением максимальной разности к
диапазону преобразования.

На графике максимальная разность
имеет место при входном сигнале x :

$d_{max} = y - y'$. Относительная приведенная
нелинейность для случая $x_{min} = 0$

$$n_d = (d_{max} / x_{max}) 100\%$$

Гистерезис — это явление, вызывающее неоднозначность функции преобразования при увеличении и уменьшении входной величины. График (рис. в) иллюстрирует функцию преобразования с гистерезисом. Она имеет две ветви: восходящую и нисходящую, которые образуют замкнутую петлю. При увеличении x процесс идет по правой ветви, а при снижении — по левой. Переход с одной ветви на другую происходит при постоянном значении выходной величины. В пределах зоны, ограниченной ветвями характеристики, средство измерения теряет чувствительность ($k = 0$), в связи с чем эта зона называется *зоной*

Относительное приведенное значение гистерезиса определяется по максимальной ширине зоны:

$$n_g = (g_{max} / x_{max}) 100\%$$

Применительно к измерительным приборам гистерезис выражается через *вариацию показаний*, которая определяется тем же способом.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Порог чувствительности в отличие от гистерезиса проявляется при изменении входного сигнала в одну сторону и выражается в том, что плавному изменению входной величины соответствуют ступенчатые изменения выходной. Минимальный прирост входной величины, вызывающий изменение выходной величины, называется *порогом чувствительности* и может выражаться в абсолютных значениях входной величины в следующей формуле:

$$n_s = (s/x_{max})100\%$$

где s — абсолютное значение порога чувствительности.

Дрейф, или *смещение нуля*, приводит к соответствующему смещению функции преобразователя.

Дрейф нуля задается в абсолютных или относительных единицах, отнесенных к контрольному промежутку времени (час, сутки и т. д.).

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Задача средств измерений в условиях переменного входного сигнала состоит в воспроизведении сигнала с наименьшими искажениями. В этом смысле функция преобразования линейного элемента

$$y = kx$$

может рассматриваться как идеальная динамическая характеристика.

В нее не входят в качестве аргументов время или частота. Следовательно, такой элемент или цепь в целом воспроизведут на выходе изменяющийся во времени входной сигнал без всяких искажений, какую бы форму он ни имел. Изменится лишь в k раз масштаб входного сигнала.

ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Динамический элемент, имеющий характеристику такого вида, называется усилительным или пропорциональным элементом.

Реальные средства измерений, измерительные цепи и их элементы вносят в измеряемую величину динамические искажения.

В холодильной технике непосредственно с динамическими характеристиками измерительных цепей связаны измерения быстроменяющихся давлений и температур в полостях сжатия компрессоров, пульсаций давлений в

Способы представления динамических характеристик

Динамические характеристики могут представляться в виде переходных характеристик, частотных характеристик и передаточных функций

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Переходная характеристика — это аналитическое или графическое изображение поведения выходной величины во времени при изменении входной величины по заранее известному закону (чаще всего — в виде ступенчатой функции). В общем виде переходная характеристика имеет вид

$$y = f_1(\tau) \quad \text{при} \quad x = f_2(\tau)$$

где f_1 — искомая функция; f_2 — известная функция.

Переходную характеристику получают путем решения дифференциального уравнения или экспериментально.

Частотные характеристики — это зависимость амплитуды и фазы выходной величины от частоты входного гармонического сигнала.

Если на вход подавать гармонический сигнал

$$x(\tau) = X \sin(\omega \tau)$$

то на выходе будет иметь место сигнал

$$y(\tau) = Y \sin(\omega \tau + \varphi)$$

частота которого ω останется той же, а амплитуда и фаза изменятся.

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

В векторной форме эти выражения записываются в виде:

$$\bar{x}(\tau) = X e^{j\omega\tau};$$
$$\bar{y}(\tau) = Y e^{[j\omega\tau + \phi(\omega)],}$$

где X и $Y(\omega)$ — модули векторов $\bar{x}(\tau)$ и $\bar{y}(\tau)$;
 ω — угловая частота сигналов; $\phi(\omega)$ —
угол сдвига фаз между вект($\bar{x}(\tau)$) и $\bar{y}(\tau)$ и
.

Векторы входного и выходного сигналов вращаются с одинаковой угловой частотой ω , но выходной вектор отстает от входного на угол $\phi(\omega)$, зависящий от частоты. Кроме того, вектор имеет модуль $Y(\omega)$, зависящий от частоты.

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Введем в рассмотрение отношение

$$W(j\omega) = \frac{\bar{y}(\tau)}{\bar{x}(\tau)} = \frac{Y e^{[j\omega\tau + \varphi(\omega)]}}{X e^{j\omega\tau}} = K(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$$

Выражение $W(j\omega)$ называют *комплексной частотной характеристикой (КЧХ)* [в литературе по автоматическому управлению и регулированию эту величину часто называют амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ)], а функции $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ — соответственно амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиками.

Частотные характеристики относятся только к условиям установившихся колебаний.

Величина $W(j\omega)$ может быть представлена в полярных координатах в виде вектора с модулем $K(\omega)$, повернутого от начала отсчета на угол $\phi(\omega)$. С изменением частоты конец вектора описывает кривую, называемую годографом. Годограф получают, рассчитывая $W(j\omega)$ для частот $\omega = 0, \omega_1, \omega_2, \omega_3$ и т. д. и соединяя полученные точки плавной кривой.

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для анализа удобно пользоваться характеристиками $K(\omega)$ и $\phi(\omega)$, заданными отдельно. Эти характеристики могут рассчитываться или определяться экспериментально и задаваться в виде аналитических функций или графиков. Частотные характеристики идеального средства измерения представляют собой прямые параллельные оси ω [$K(\omega) = \text{const}$, $\phi(\omega) = 0$].

Значительные удобства представляют в ряде случаев логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ):

$$b(m) = 20 \lg K(\omega)$$

Величина b , называемая затуханием, выражается в децибелах (дБ).

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Одной из важных особенностей частотных характеристик является возможность их экспериментального определения, что широко используется в измерительной технике. Для того чтобы найти АЧХ и ФЧХ какого-либо элемента, необходимо определить диапазон рабочих частот и выбрать некоторое число фиксированных частот в этом диапазоне.

На каждой из частот проводят опыт, подавая на вход синусоидальный сигнал с амплитудой X и регистрируя выходную амплитуду Y и разность фаз ϕ между этими сигналами. Полученные значения позволяют построить зависимости $K(\omega)$ и $\phi(\omega)$.

Передаточные функции — наиболее обобщенный вид динамической характеристики, представляющий собой отношение преобразованных, по Лапласу, выходного и входного сигналов

$$W(p) = Y(p)/X(p)$$

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Формально передаточная функция получается из комплексной частотной характеристики заменой мнимого аргумента $j\omega$ на комплексный $\alpha + j\omega$. Такая характеристика относится ко всем режимам, в том числе и к неустановившимся процессам.

В отличие от переходной и частотной характеристик передаточная функция не может быть получена прямым экспериментом. Ее определяют путем анализа дифференциальных уравнений, а также по таблицам типовых функций.

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Удобство анализа с помощью передаточных функций состоит в том, что при этом оперируют достаточно простыми алгебраическими уравнениями.

СПОСОБЫ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

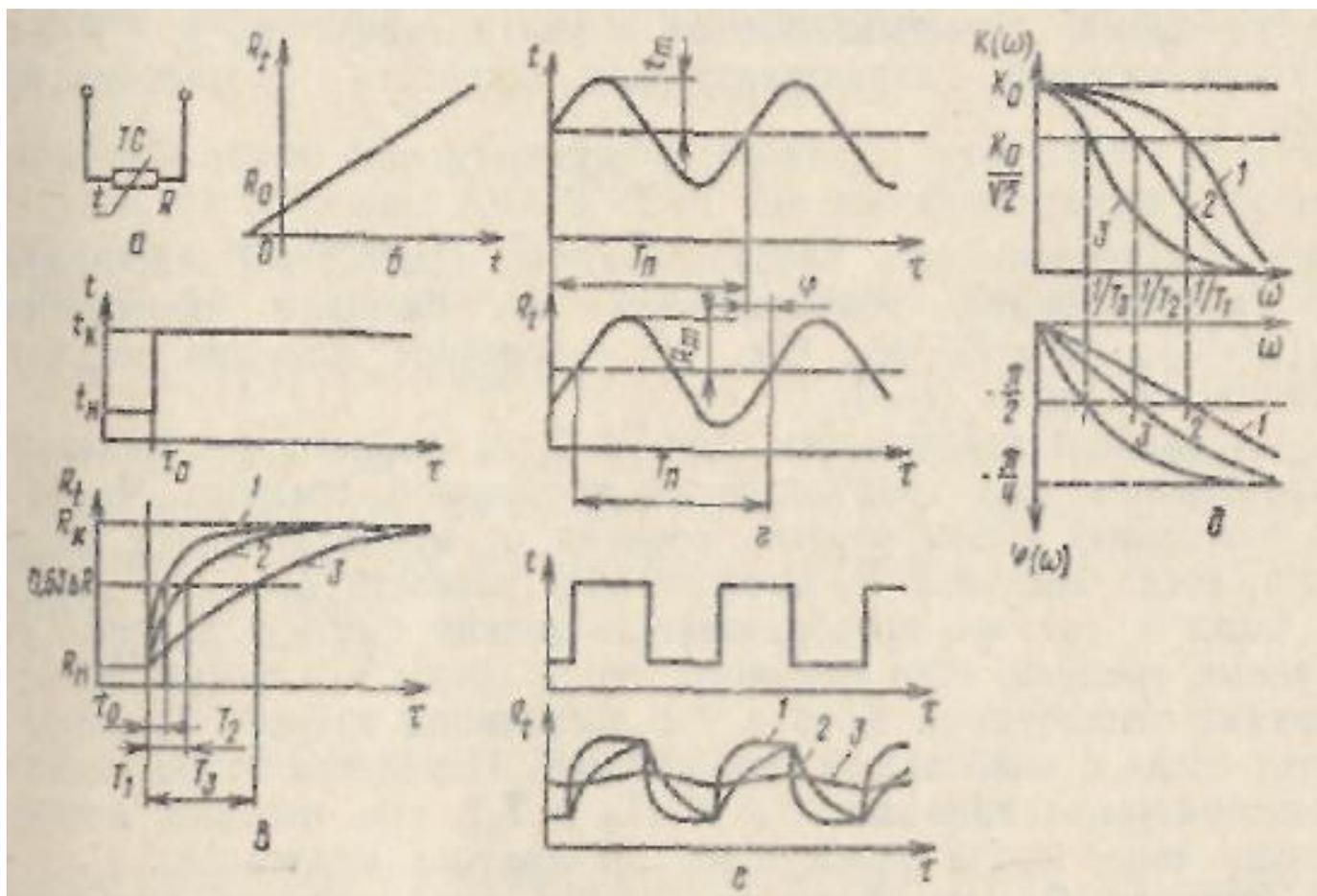
Выбор динамической характеристики зависит от поставленных задач, а также от вида сигналов, поступающих на вход средства измерения. При измерениях, встречающихся в холодильной технике, приходится иметь дело с периодическими и непериодическими сигналами. Поэтому удобными оказываются частотные и переходные характеристики.

Типовые динамические характеристики

Анализ динамических характеристик средств измерений производят, расчленяя эти средства на отдельные элементы и находя те из них, которые являются определяющими.

Для удобства пользуются типовыми динамическими характеристиками. Рассмотрим некоторые элементы, обладающие типовыми характеристиками: апериодический, колебательный, дифференцирующий и элемент чистого запаздывания.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Динамические характеристики апериодического элемента 1-го порядка (термопреобразователь сопротивления):

- а — схема преобразователя; б — статическая характеристика; в — переходные характеристики; г — воспроизведение синусоидального сигнала; д — частотные характеристики; е — воспроизведение периодических прямоугольных импульсов

Апериодический элемент 1-го порядка.

Примером может служить

термопреобразователь сопротивления ТС (термометр сопротивления), упрощенная схема которого показана на рис. а.

Сопротивление такого преобразователя зависит от окружающей температуры t и

вычисляется
$$R_t = R_0(1 + \alpha t)$$

где R_t — сопротивление при температуре t ;

R_0 — сопротивление при 0°C ; α — термический коэффициент сопротивления материала преобразователя.

Уравнение представляет собой статическую функцию преобразования, причем коэффициент преобразования

$$k_0 = \alpha R_0$$

Статическая характеристика представляет собой прямую в координатах R_t , t , проходящую через точку $(R_0, 0)$, график которой показан на рис. б.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Проведем следующий опыт. Установим некоторое начальное значение температуры t_n и выдержим его до полного установления начального сопротивления R_n (рис. в).

Установившийся процесс изображен в виде прямых, параллельных оси времени на нижнем и верхнем графиках. В момент времени t_0 скачкообразно повысим температуру до значения t_k (это можно осуществить, если быстро перенести ТС из одного термостата с $t=t_a$ в другой — с $t = t_k$).

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Из-за конечного значения коэффициента теплоотдачи от среды к ТС и его внутренней тепловой емкости температура, а, следовательно, и сопротивление не могут изменяться скачкообразно.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Приближенно процесс изменения сопротивления R_t (Ом) во времени в таком элементе описывается уравнением

$$R_t = R_H + \Delta R(1 - e^{-\tau/T})$$

где τ — время, отсчитываемое от момента скачка t_0 , с; T — постоянная времени, характеризующая скорость протекания процесса, с;

$$T = C/(kA)$$

Здесь C — теплоемкость преобразователя, Дж/°С;

kA — произведение коэффициента теплопередачи на площадь поверхности, Вт/(м²°С); $\Delta R = R_K - R_H$, Ом; R_K — конечное значение

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На нижнем графике (см. рис. в) показан ход изменения сопротивления для трех значений постоянной времени.

Численно эта постоянная равна отрезку времени от момента скачка до момента, когда величина R_t пройдет 63% разности ΔR .

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Один и тот же преобразователь может иметь различные постоянные времени, если помещать его в среды с разными коэффициентами теплоотдачи.

Кривая 1 с постоянной времени T_1 соответствует среде с наибольшей теплоотдачей.

Изменение сопротивления, характеризуемое кривыми 2 и 3 (T_2 и T_3), при меньших коэффициентах теплоотдачи происходит значительно медленнее.

Величина R_t приближается асимптотически к конечному значению R_k . Поэтому время полного установления процесса стремится к бесконечности. Часто пользуются временем 99%-ного приближения (недоход на 1%). Подставляя соответствующие значения в уравнение, можно вычислить постоянную времени: $T \approx \tau_{99}/4,6$. Здесь τ_{99} — время 99%-ного приближения).

График (см. рис. в) и выражение

$$R_t = R_H + \Delta R(1 - e^{-\tau/T})$$

представляют собой переходную характеристику термopреобразователя сопротивления при скачкообразном изменении температуры.

Динамические свойства рассматриваемого термопреобразователя сопротивления можно выразить через частотные характеристики.

Для экспериментального получения частотных характеристик входную величину — в нашем случае температуру — надо изменять по синусоидальному закону. Технически это достаточно сложно, поэтому ограничимся лишь физической картиной эксперимента.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пусть температура изменяется периодически по синусоидальному закону

$$t = t_m \sin(\omega\tau)$$

Это вызовет вынужденные колебания сопротивления преобразователя:

$$R_t = R_m \sin(\omega\tau - \varphi)$$

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В этих формулах ω — угловая частота колебаний, рад/с. При этом $\omega = 2\pi f = 2\pi/T_{\pi}$; f — частота колебаний, Гц; ϕ — угол сдвига фаз между колебаниями температуры и сопротивления, рад; T_{π} — период колебаний, с; R_m и t_m — амплитудные значения сопротивления и температуры.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Из графиков и формул видно, что выходная величина $R(t)$ изменяется синхронно с входной t , однако имеет место отставание выходной величины по фазе на угол ϕ .

Если при неизменной амплитуде t_m изменять угловую частоту ω (или период T_m), то окажется, что амплитуда R_m и фазовый угол ϕ выходного сигнала будут изменяться. Зависимости этих величин от частоты называются частотными характеристиками. Запишем выражение для амплитудно-частотной характеристики

$$K(\omega) = R_m(\omega) / t_m$$

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Фазочастотную характеристику обозначим $\phi(\omega)$.

На графиках (рис, д) показаны АЧХ и ФЧХ для преобразователя с тремя постоянными времени: T_1 , T_2 и T_3 .

Видно, что с ростом частоты $K(\omega)$ плавно уменьшается от K_0 до нуля, а $\phi(\omega)$ увеличивается от 0 до $-\pi/2$ (здесь K_0 — коэффициент передачи при нулевой частоте). При этом, чем меньше постоянная времени, тем более широкую полосу частот охватывает характеристика. Частота, при которой $K(\omega) = K_0 2^{0,5}$, а $\phi(\omega) = -\pi/4$, называется граничной.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В данном случае

$$\omega_{г1} = \frac{1}{T_1}, \quad \omega_{г2} = \frac{1}{T_2}, \quad \omega_{г3} = \frac{1}{T_3}.$$

Амплитудно-фазочастотные характеристики могут быть найдены аналогично

$$\left. \begin{aligned} K(\omega) &= \frac{K_0}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}; \\ \varphi(\omega) &= -\operatorname{arctg}(\omega T). \end{aligned} \right\}$$

Эти формулы позволяют найти частотные характеристики, используя для этого параметры переходных характеристик.

В некоторых случаях, например при измерениях быстроменяющихся температур в цилиндрах компрессоров, преобразователь оказывается под воздействием периодически меняющейся температуры.

Можно ожидать, что в силу своих инерционных свойств преобразователь будет вносить искажения, которые тем больше, чем более круто изменяется температура во времени.

Предельным случаем является последовательность прямоугольных импульсов (рис. е). График показывает, что наименьшие искажения вызывает преобразователь с малой постоянной времени (кривая 1). При больших T имеют место очень сильные искажения (линия 3).

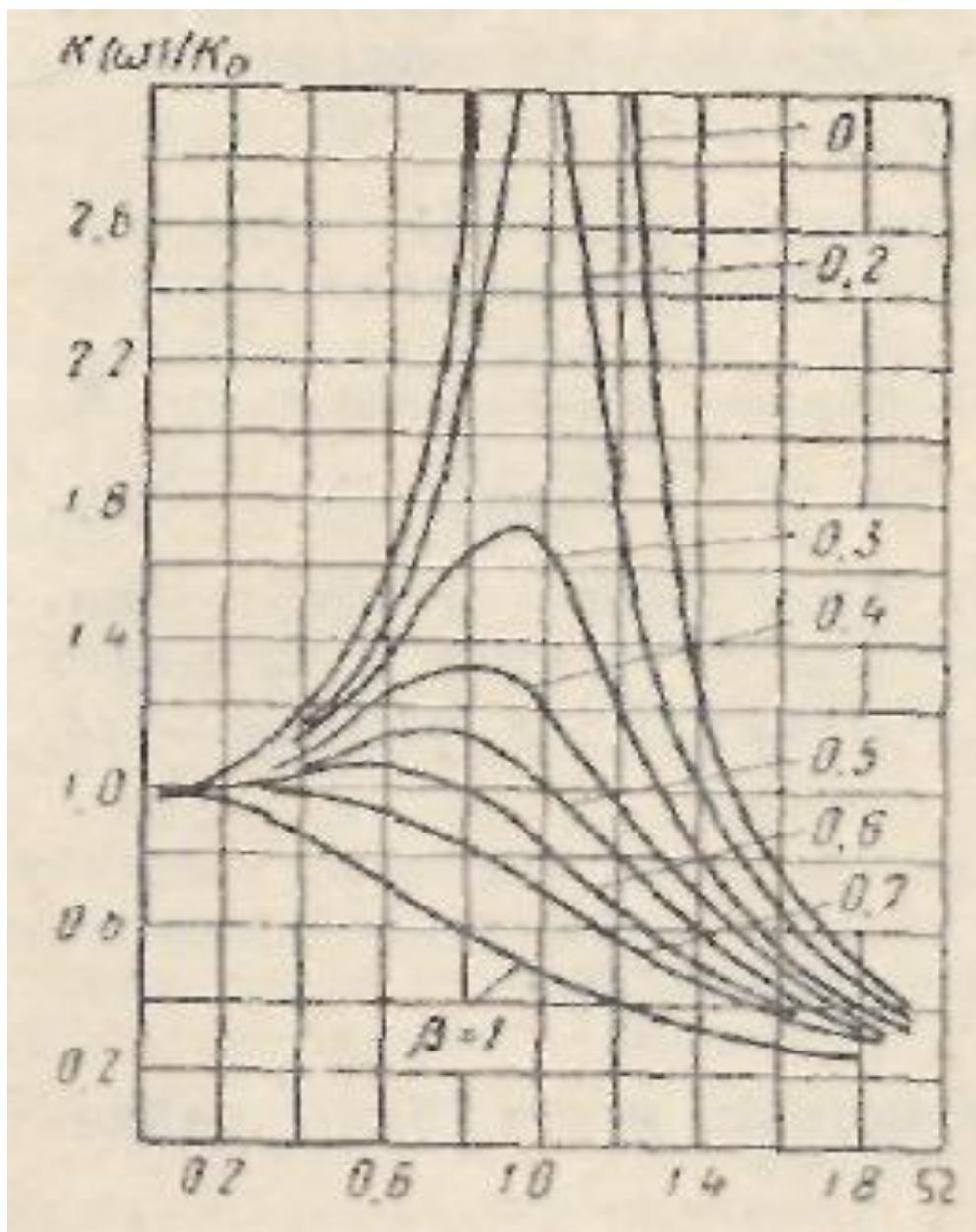
В заключение запишем передаточную функцию апериодического элемента 1-го порядка:

$$W(p) = K_0 / (Tp + 1)$$

здесь символ p — оператор Лапласа.

Частотная характеристика колебательного элемента приведена на следующем рисунке.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Частотные
характеристик
и
колебательног
о элемента

Пример 1. Термометром (Тм) измеряют температуры t_1 и t_2 жидкостей в двух сосудах, переноса термометр из одного сосуда в другой. Необходимо рассчитать время, в течение которого показание термометра приблизится к измеряемой температуре и будет отличаться от нее не более чем на $0,1$ °С.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пусть $t_1 = 0^\circ\text{C}$, $t_2 = 20^\circ\text{C}$, постоянная времени $T = 20$ с. Примем, что время переноса термометра и изменения его температуры в процессе переноса малы и ими можно пренебречь.

$$t_{\text{ТМ}} = t_1 + (t_2 - t_1)(1 - e^{-\tau/T})$$

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

По условию $t_2 - t_M \leq 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$; $t_2 - t_1 = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$.

После несложных преобразований

получаем

$$(t_2 - t_{TM})(1/20) = e^{-\tau/T} \quad \text{или} \quad 0,1/20 = 0,05 = e^{-\tau/T}$$

Путем логарифмирования находим $t/T = 5,3$, откуда $t = 5,3T = 106 \text{ с}$. Условие задачи будет выполнено, если отсчет температуры будет произведен не ранее чем через 106 с после переноса термометра.

Пример 2. Малоинерционным термопреобразователем температуры с постоянной времени $T = 10^{-2}$ с измеряют колебания температуры. Необходимо определить, при какой частоте синусоидальные колебания будут воспроизводиться с амплитудой, уменьшенной на 10% по сравнению с нулевой частотой.

Воспользуемся формулой

$$K(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{1 + \omega^2 T^2}}$$

подставив в нее $K(\omega) = 0,9 K_0$ и $T = 10^{-2}$ с.

откуда $\omega \sim 0,5 \cdot 10^2$ рад/с, а частота $f = \omega / 2\pi = 0,5 \cdot 10^2 / 2\pi = 8$ Гц.

Следовательно, условие уменьшения амплитуды будет выполнено при частоте не выше 8 Гц.

Колебательный элемент 2-го порядка.

Примером колебательного элемента может служить металлическая мембрана, жестко закрепленная по периметру.

Отличительным свойством такого элемента являются свободные колебания: если приложить к мембране кратковременную возмущающую силу, то в ней возникают свободные затухающие колебания с определенной частотой, называемой собственной. При вынужденных колебаниях, например при воздействии периодически изменяющегося давления, амплитуда зависит от частоты.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Амплитудно-частотная характеристика колебательного элемента записывается в виде

$$K(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}$$

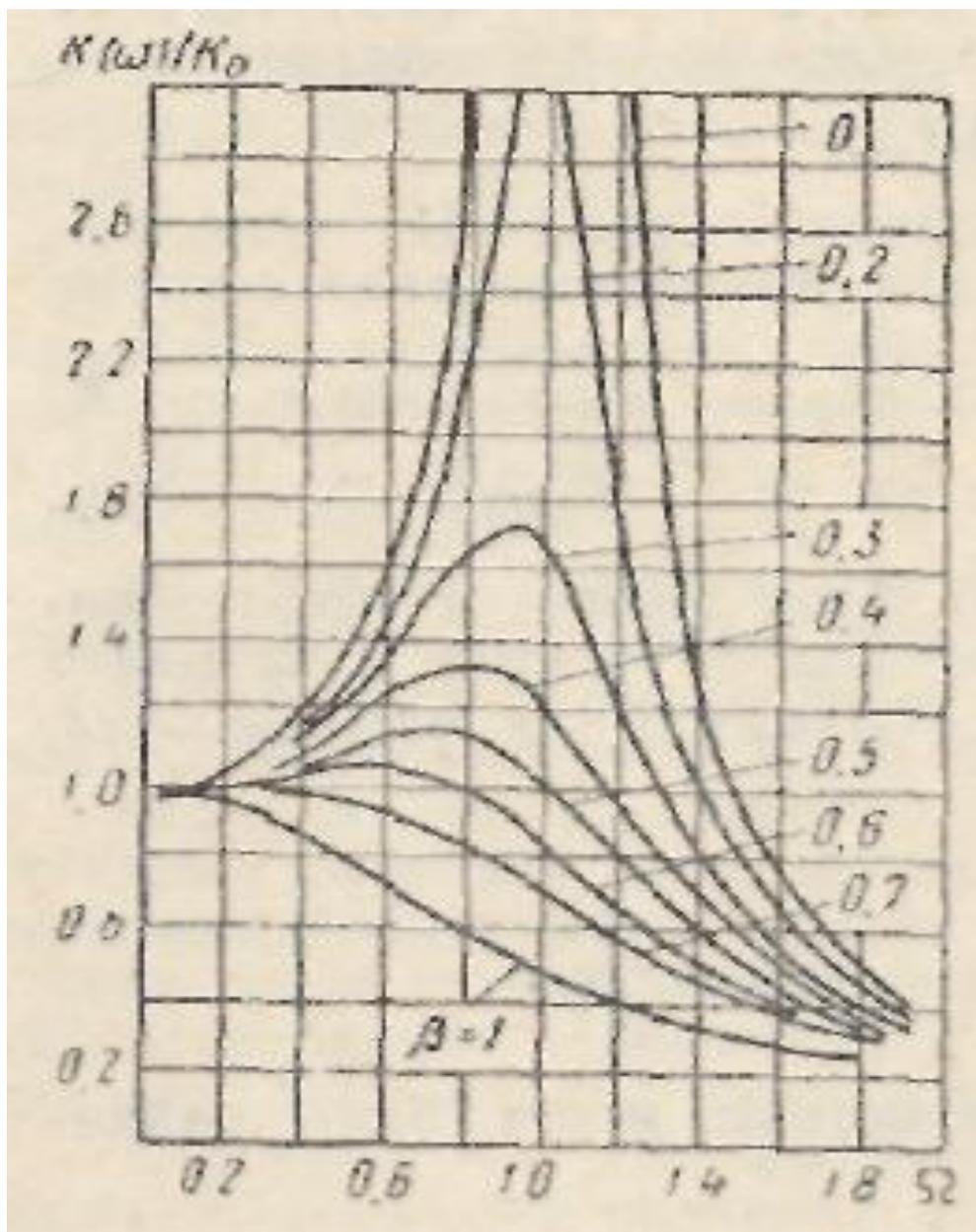
где $K(\omega)$ — коэффициент передачи при угловой частоте ω (или при частоте f); K_0 — коэффициент передачи при нулевой частоте; Ω — относительная частота,

$$\Omega = \omega / \omega_0 = f / f_0$$

Здесь $\omega_0 = 2\pi f_0$ — собственная угловая частота свободных колебаний; β — степень успокоения, или относительное затухание.

Характерным режимом колебательного элемента является резонанс, при котором $\Omega \approx 1$ ($\omega \approx \omega_0$), а $K(\omega) \approx K_0/2\beta$. При резонансе амплитуда колебаний может резко возрасти. На графике (рис. Частотные характеристики колебательного элемента) показаны амплитудно-частотные характеристики колебательного элемента при различных значениях затухания. При резонансе наблюдается подъем характеристики, тем более резкий, чем меньше величина β .

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Частотные
характеристик
и
колебательног
о элемента

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При использовании колебательных элементов для измерения сигналов с широким спектром частот и во избежание искажений стремятся работать при частотах, меньших, чем резонансная частота. Если обозначить $\gamma = K(\omega)/K_0$, то, воспользовавшись форм

$$K(\omega) = \frac{K_0}{\sqrt{(1 - \Omega^2)^2 + 4\beta^2\Omega^2}}$$

можно определить максимальную частоту сигнала, при которой повышение амплитуды будет не больше заданной.

Приблизенно выражение имеет вид

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 - 1/\gamma^2}{2(1 - 2\beta^2)}}$$

Из теории известно, что при $\beta = 0,707$ амплитудно-частотная характеристика не имеет резонансного подъема и с точки зрения воспроизведения сигнала является наиболее благоприятной.

Пример. Собственная частота свободных колебаний мембраны $f_0 = 10$ кГц.
Относительное затухание $\beta = 0,3$.
Определить предельную частоту синусоидальных колебаний давления, при которой резонансный подъем превышает коэффициент передачи при нулевой частоте не более чем на 10%, т. е. $\gamma = 1,1$.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

По формуле

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1 - 1/\gamma^2}{2(1 - 2\beta^2)}}$$

найдем

$$f = 10 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{1 - 1/1,1^2}{2(1 - 2 \cdot 0,3^2)}} = 3,2 \cdot 10^3 \text{ Гц}$$

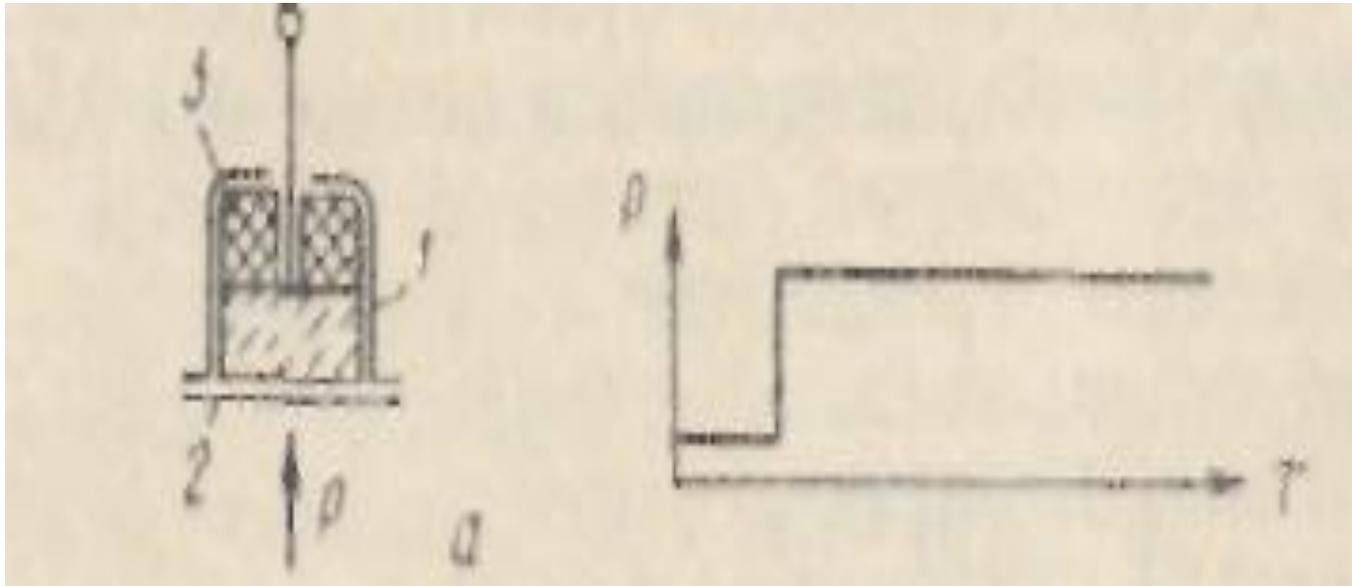
Следовательно, мембрана передает колебания давления с заданными условиями в диапазоне частот от 0 до 3,2 кГц.

Дифференцирующий элемент.

Типичным представителем измерительного устройства с дифференцирующими свойствами является преобразователь (датчик) давления с пьезоэлектрическим чувствительным элементом.

Такие элементы изготавливают из кристаллического кварца или пьезокерамики.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ



Динамические характеристики
дифференцирующего элемента
(пьезоэлектрический преобразователь
давления): конструктивная схема

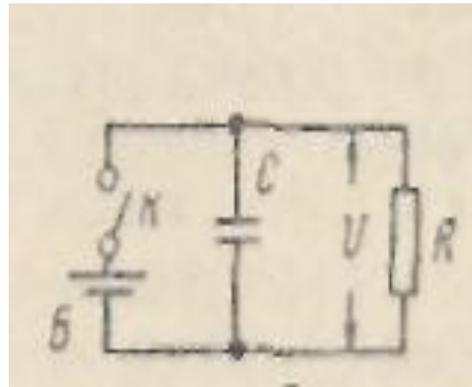
ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Чувствительный элемент 1 (кварц или пьезокерамика) помещается между разделительной мембраной 2 и изолирующим упором 3. Если сжимать чувствительный элемент, то между его гранями (в данном случае — верхней и нижней) возникает электрический заряд, пропорциональный приложенной силе.

В идеальном дифференцирующем элементе скачкообразное входное воздействие вызывает появление на выходе импульса напряжения бесконечно большой высоты и бесконечно малой длительности.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пьезоэлектрический элемент не является идеальным. Как следует из упрощенной эквивалентной схемы,

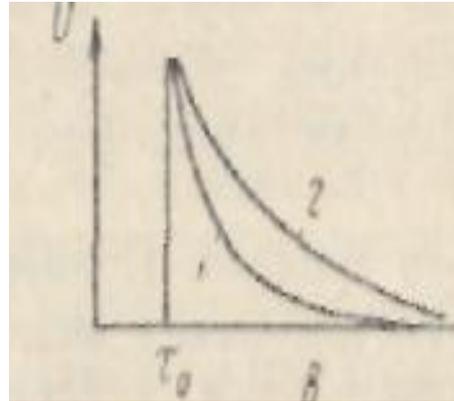


создаваемый пьезоэлементом заряд накапливается в емкости C . Величина заряда имитируется определенным временем замыкания ключа K , через который ток от источника B течет в конденсатор, заряжая $q = \int i dt$ напряжения $U = q/C$,

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Поскольку зарядка емкости происходит через малое (в данном случае — нулевое) сопротивление, временем нарастания напряжения можно пренебречь. После передачи в емкость заряда ключ размыкается и начинается разряд емкости через сопротивление утечки R_y (это сопротивление включает параллельно соединенные внутренние утечки, входные сопротивления воспринимающей аппаратуры и т. д.). Чем меньше величина R_y , а следовательно, и постоянная времени $T = R_y C$, тем быстрее происходит разряд.

Процесс воспроизведения ступенчатого изменения давления показан на рисунке.

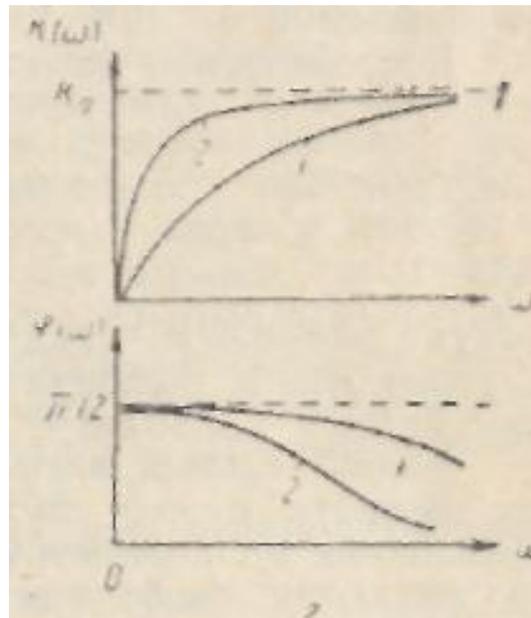


Кривая 1 соответствует случаю малого сопротивления утечки (малой постоянной времени T), кривая 2 — большому сопротивлению (большой постоянной времени).

Эти кривые, представляющие собой переходные характеристики, свидетельствуют о том, что, варьируя параметры преобразователя, можно существенно изменить динамические характеристики преобразователя. Вместе с тем принципиальную особенность его, а именно невозможность передать постоянную составляющую, устранить невозможно.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

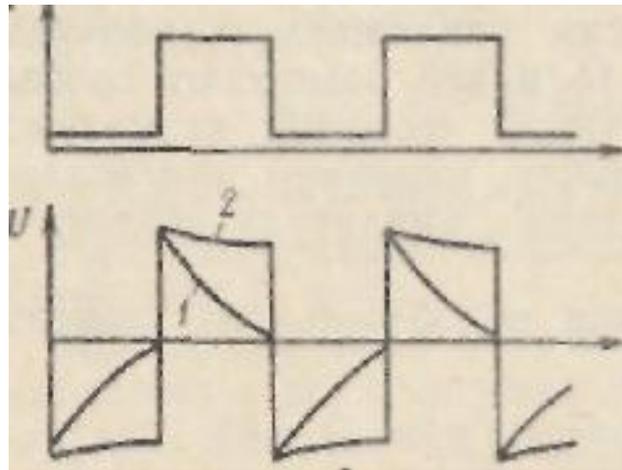
Это иллюстрируется частотными характеристиками.



Амплитудно-частотная характеристика показывает, что при частоте $\omega = 0$ коэффициент преобразования $K(\omega)=0$.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Графики



иллюстрируют воспроизведение периодических прямоугольных импульсов преобразователем с малой (1) и большой (2) постоянной времени цепи утечки. Видно, что при относительно малой T имеют место очень сильные искажения сигнала. При больших T искажения заметно уменьшаются.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Другими словами, рассмотренный преобразователь хорошо воспроизводит сигналы достаточно высокой частоты, при снижении частоты коэффициент преобразования падает вплоть до нуля при постоянном сигнале.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Передаточная функция рассмотренного элемента имеет вид

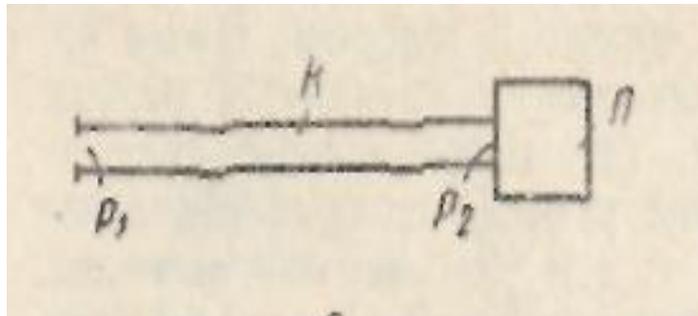
$$W(p) = K_0 p / (T_p + 1)$$

а амплитудно-частотная характеристика

$$K(\omega) = \frac{K_0 \omega \sqrt{1 + \omega^2 T^4}}{1 + \omega^2 T^2}$$

Элемент чистого запаздывания.

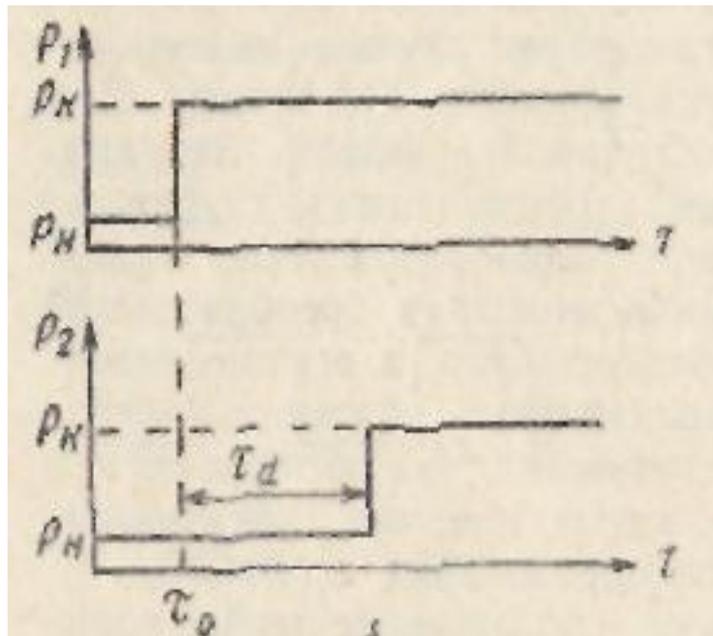
Примером элемента чистого запаздывания может служить соединительный канал K между источником давления и входом преобразователя Π



Если давление на входе в канал обозначить p_1 , а на выходе — p_2 , то любое изменение давления на входе будет воспроизведено на выходе через определенный промежуток времени, называемый чистым, или транспортным, запаздыванием. При этом предполагается, что сама измеряемая величина передается без всяких искажений.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

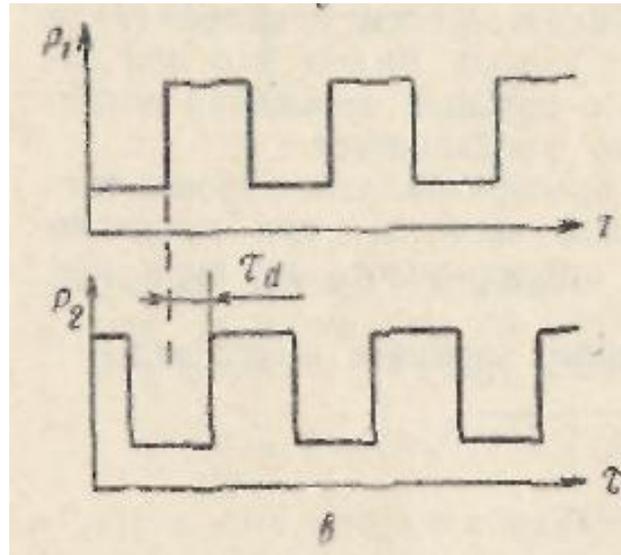
График



представляющий собой переходную характеристику, иллюстрирует действие элемента запаздывания. В момент времени t_0 давление p_1 на входе скачкообразно изменяется от p_n до p_k . Через время чистого запаздывания t_d аналогичный скачок произойдет на выходном конце.

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

На рисунке



показано прохождение периодических прямоугольных импульсов через элемент запаздывания. Форма и высота импульсов не изменяются. Происходит лишь сдвиг по времени на величину t_d .

Передаточная функция элемента запаздывания имеет вид

$$W(p) = e^{-p\tau d}$$

Динамические характеристики измерительных цепей

На основании динамических характеристик отдельных элементов можно составить динамическую характеристику всей измерительной цепи.

Для этого удобно воспользоваться передаточными функциями, применяя простые правила. Если элементы соединены последовательно, их общая передаточная функция равна произведению передаточных функций элементов:

$$W(p) = W_1(p)W_2(p) \dots W_N(p)$$

Передаточная функция параллельно включенных элементов равна сумме передаточных функций элементов:

$$W(p) = W_1(p) + W_2(p) + \dots + W_N(p)$$

Пример. Измерительная цепь составлена из трех последовательных элементов: пьезоэлектрического датчика давления с передаточной функцией

$$W_1(p) = K_1 p / (T_1 p + 1);$$

Усилителя

$$W_2(p) = K_2;$$

магнитоэлектрического гальванометра (шлейфа) осциллографа

$$W_3(p) = K_2 / (T_3 p + 1).$$

ТИПОВЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Пользуясь указанным правилом, находим общую передаточную функцию

$$W(p) = \frac{K_1 K_2 K_3 p}{(T_1 p + 1)(T_3 p + 1)}$$

Для получения частотных характеристик необходимо заменить оператор p на $j\omega$ и далее, пользуясь правилами преобразования, найти амплитудно- и фазо-частотные характеристики.