

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ И ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ САР

Методические указания
к лабораторным работам 1 и 2

Изложены методы теоретического и экспериментального исследования динамических характеристик типовых звеньев систем автоматического регулирования (САР). Даны варианты заданий, конкретные примеры расчета и вопросы для подготовки к сдаче лабораторных работ.

Методические указания рекомендуются для студентов, обучающихся по специальностям 0537, 0538, 1610 по курсу «Теория автоматического регулирования».

Составители: Гимадиев А. Г., Конев А. Г.

Рецензенты: кафедра «Автоматизация теплоэнергетических процессов» Куйбышевского политехнического института, зам. начальника отдела регулирования Куйбышевского моторного завода С. М. Игначков

Утверждены редакционно-издательским советом института

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Любую систему автоматического регулирования (САР) можно представить в виде соединения отдельных типовых звеньев. Типовым звеном (ТЗ) называют элемент или узел системы регулирования, который независимо от физической природы процессов, протекающих в нем, одинаково реагирует на один и тот же вид возмущения. Это означает, что два или несколько звеньев САР будут одного типа, если они имеют одинаковую функциональную зависимость между входным и выходным параметрами.

Для всех ТЗ характерны некоторые общие признаки: каждое ТЗ имеет четко обозначенный вход и выход; сигнал через ТЗ распространяется в одном направлении — со входа на выход. В структурных схемах САР типовое звено обозначают в виде прямоугольника, внутри которого записывается его функциональная зависимость, выраженная в операторной форме (передаточная функция).

Разбивка САР на ТЗ облегчает анализ и синтез системы, так как позволяет воспользоваться хорошо разработанными в теории автоматического регулирования (ТАР) методами.

По виду функциональной зависимости ТЗ подразделяются на апериодическое, колебательное, дифференцирующее, интегрирующее, усилительное и звено чистого запаздывания. Это основные типы звеньев, с использованием которых могут быть получены другие типовые звенья, но не более второго порядка (по виду дифференциального уравнения). Уравнения ТЗ систем регулирования выводятся на основе тех или иных физических законов, по которым протекают процессы в звеньях. При исследовании динамики в САР нужно уметь не только выделять ТЗ в системе регулирования и составлять их уравнения, но и определять численные значения входящих в уравнения коэффициентов. Существуют два метода определения этих коэффициентов: расчетный и экспериментальный.

Расчетный метод не во всех случаях достаточно точен. Принятые при выводе уравнений допущения могут привести к существенным ошибкам. Поэтому на этапе доводки САР часто применяют экспериментальный метод определения коэффициентов. При этом можно воспользоваться переходными или частотными характеристиками ТЗ.

В качестве примеров рассмотрены звенья, которые часто реализуются в САР авиационных двигателей. При выводе уравнений ТЗ основная трудность заключается в обосновании и принятии упрощающих допущений. Учет многих факторов приводит к усложнению расчетной модели, а принятие грубых допущений — к исключению из анализа основных свойств звена. Поэтому нужно всегда иметь в виду, в рамках какой расчетной динамической модели системы будет исследоваться то или иное звено.

Апериодическое типовое звено. Однолопастный ТРД (рис. 1а) при определенных допущениях является характерным примером аperiодического ТЗ. Для ТРД одним из основных выходных регулируемых параметров является частота вращения ротора двигателя n , а входных — расход топлива в камере сгорания G_T . Основной зависимостью, которая используется при проектировании САР

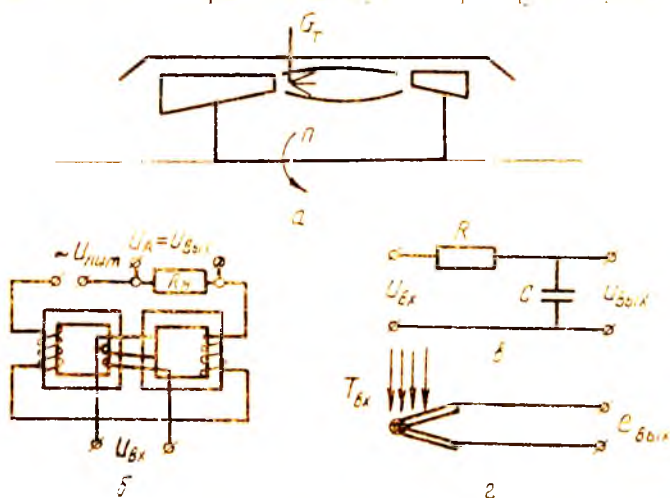


Рис. 1. Примеры аperiодических типовых звеньев

двигателя, является выражение, связывающее частоту вращения ротора n и расход топлива G_T в неустановившемся режиме. Эта зависимость определяется уравнением движения ротора двигателя

$$\frac{\pi}{30} I \frac{dn}{dt} = M_t(n, G_T) - M_k(n, G_T), \quad (1)$$

где I — момент инерции ротора двигателя; $M_T(n, G_T)$ — момент, развиваемый турбиной; $M_K(n, G_T)$ — момент противодействия компрессора.

Принимая допущение о малости изменения параметров n и G_T в «окрестности» какого-либо установившегося режима, можно представить уравнение (1) в следующей линеаризованной форме:

$$\frac{\pi}{30} I \frac{d \Delta n}{dt} = \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0 \Delta n + \left(\frac{\partial M_K}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T - \left(\frac{\partial M_K}{\partial n} \right)_0 \Delta n - \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T,$$

или

$$\frac{\pi}{30} I \frac{d \Delta n}{dt} + \left[\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0 \right] \Delta n - \left[\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_K}{\partial G_T} \right)_0 \right] \Delta G_T = 0, \quad (2)$$

где Δn , ΔG_T — малые отклонения параметров от их установившихся значений; индекс «0» соответствует значениям производных, взятых для установившегося режима — n_0 , G_{T0} .

Уравнение (2) является дифференциальным уравнением ТРД, которое можно представить в стандартной форме:

$$T \frac{d \Delta n}{dt} + \Delta n = k \Delta G_T,$$

где

$$T = \frac{I \frac{\pi}{30}}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0} — \text{постоянная времени двигателя};$$

$$k = \frac{\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_K}{\partial G_T} \right)_0}{\left(\frac{\partial M_K}{\partial n} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0} — \text{коэффициент усиления двигателя}.$$

Каждому режиму работы ТРД будет соответствовать свои значения коэффициентов T и k . ТРД как объект регулирования представляет собой аperiodическое ТЗ, дифференциальное уравнение которого имеет вид

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = k x_{\text{вх}}, \quad (3)$$

где $x_{\text{вх}}$, $x_{\text{вых}}$ — входной и выходной параметры ТЗ; T — постоянная времени; k — коэффициент усиления ТЗ.

Уравнением аperiodического звена описываются также магнитный усилитель (рис. 1,б), электрическая RC — цепь (рис. 1,в), терморара (рис. 1,г). Например, для электрической цепи на основании второго закона Кирхгофа можно записать

$$U_{\text{вх}} = U_D + U_C = iR + U_{\text{вых}}, \quad (4)$$

Ток в цепи определяется выражением $i = C \frac{dU_{\text{вых}}}{dt}$, подставляя

которое в уравнение (4), получим:

$$U_{\text{вых}} = RC \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}}. \quad (5)$$

Обозначив $T = RC$, можно записать уравнение (5) в форме уравнения аперiodического звена:

$$T \frac{dU_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}.$$

Колебательное типовое звено. Из теоретической механики известно, что любую колебательную систему с одной степенью свободы (рис. 2,а) можно описать дифференциальным уравнением второго порядка

$$T^2 \frac{d^2x_{\text{вых}}}{dt^2} + 2T\zeta \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = kx_{\text{вх}}, \quad (6)$$

где T — постоянная времени, характеризующая собственную частоту колебаний системы; ζ — коэффициент демпфирования; k — коэффициент усиления, или коэффициент передачи.

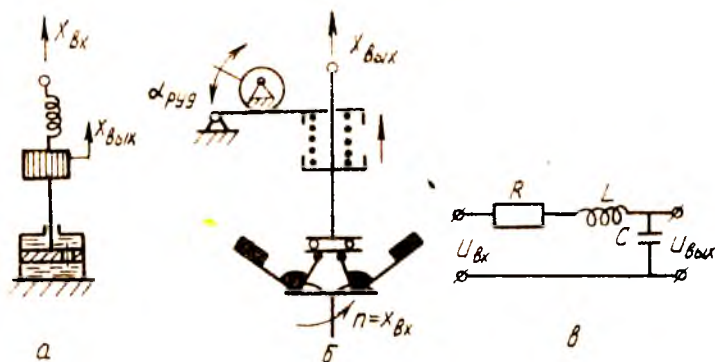


Рис. 2 Примеры колебательных типовых звеньев

Звено, описываемое дифференциальным уравнением (6), называют колебательным ТЗ. К колебательному ТЗ можно отнести также центробежный чувствительный элемент частоты вращения (рис. 2,б) и электрический колебательный контур (рис.2,в). Согласно второму закону Кирхгофа для электрической цепи можно записать

$$U_{\text{вх}} = U_L + U_R + U_C \quad (7)$$

Падения напряжения на индуктивности L , активном сопротивлении R и емкости C определяются из выражений

$$U_L = L \frac{di}{dt}; \quad U_R = iR; \quad U_C = U_{\text{вых}}. \quad (8)$$

где $i = C \frac{dU_c}{dt}$.

Подставляя выражения (8) в уравнение (7) с учетом равенства для тока i , получим:

$$LC \frac{d^2 U_{\text{вых}}}{dt^2} + RC \frac{d U_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}.$$

или

$$T^2 \frac{d^2 U_{\text{вых}}}{dt^2} + 2T\zeta \frac{d U_{\text{вых}}}{dt} + U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}, \quad (9)$$

где $T = \sqrt{LC}$ — постоянная времени; $\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$ — коэффициент демпфирования.

Как видно из уравнения (9), электрический колебательный контур представляет собой колебательное ТЗ.

Дифференцирующее типовое звено. Дифференцирующее типовое звено может быть идеальным и реальным. Идеальное дифференцирующее ТЗ описывается зависимостью

$$x_{\text{вых}} = k \frac{dx_{\text{вх}}}{dt}, \quad (10)$$

где k — коэффициент передачи звена.

Примером идеального дифференцирующего ТЗ является статическая часть регулятора частоты вращения (рис. 3,а), применяемая как корректирующее устройство для улучшения динамических свойств регулятора. Уравнение статической части регулятора связывает перепад давления Δp на поршне с динамическим расходом жидкости ΔQ во входном (выходном) штуцере. Считая жидкость в статической части несжимаемой и допуская, что инерционные силы и силы трения малы по сравнению с силой перепада давления, можно записать уравнения баланса сил и расхода жидкости:

$$\left. \begin{aligned} \Delta p F_n &= 2 C_{\text{пр}} \Delta x; \\ \Delta Q &= F_n \frac{d \Delta x}{dt}, \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где F_n — площадь поршня; $C_{\text{пр}}$ — жесткость пружины; Δx — перемещение поршня.

В результате совместного решения уравнений (11) получим

$$\Delta Q = k \frac{d \Delta p}{dt}, \quad (12)$$

где $k = \frac{F_n^2}{2 C_{\text{пр}}}$ — коэффициент передачи статической части регулятора.

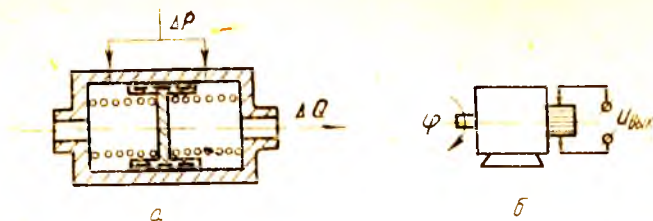


Рис. 3. Примеры идеальных дифференцирующих типовых звеньев

Если обозначить $\Delta Q = x_{\text{вых}}$, а $\Delta p = x_{\text{вх}}$, то уравнение (12) примет вид уравнения для идеального дифференцирующего ТЗ (10). Другим примером этого ТЗ является тахогенератор (рис. 3.б). Напряжение на выходе из тахогенератора $U_{\text{вых}}$ пропорционально частоте вращения или производной от угла поворота якоря:

$$U_{\text{вых}} = k \frac{d\varphi}{dt}.$$

Примером реального дифференцирующего звена является катракт (рис. 4.а), устанавливаемый в цепи местной обратной связи

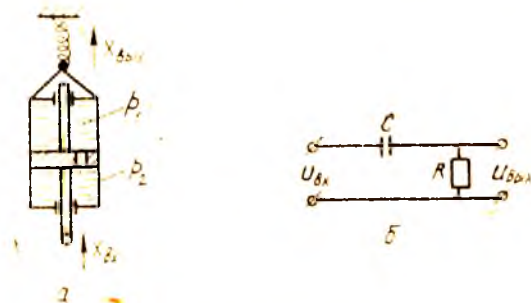


Рис. 4. Примеры реальных дифференцирующих типовых звеньев

поздормного регулятора и служащий для улучшения качества переходного процесса в САР. Входным параметром является перемещение штока поршня $x_{\text{вх}}$, а выходным — координата цилиндра $x_{\text{вых}}$.

Из совместного решения уравнений баланса сил

$$F_n (p_1 - p_2) = x_{\text{вых}} C_{\text{оп}}.$$

расходов

$$Q_{\text{вх}} = F_n \left(\frac{dx_{\text{вх}}}{dt} - \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} \right),$$

а также движения жидкости через жиклер

$$p_1 - p_2 = R_{ж} Q_{ж}$$

получим уравнение катаракта

$$\frac{F_n^2 R_{ж}}{C_{пр}} \frac{dx_{max}}{dt} + x_{max} = \frac{F_n^2 R_{ж}}{C_{пр}} \frac{dx_{вх}}{dt} \quad (13)$$

где F_n — площадь поршня; $C_{пр}$ — жесткость пружины; $R_{ж}$ — гидравлическое сопротивление жиклера (при ламинарном движении жидкости); $Q_{ж}$ — объемный расход жидкости через жиклер.

Уравнение (13) можно представить в следующем виде:

$$T \frac{dx_{max}}{dt} + x_{max} = k T \frac{dx_{вх}}{dt} \quad (14)$$

где $T = \frac{F_n^2 R_{ж}}{C_{пр}}$ — постоянная времени; k — коэффициент передачи звена (в данном случае $k = 1$).

Уравнение (14) является уравнением реального дифференцирующего звена. Другим примером такого звена является электрическая CR — цепь (рис. 4,б). Воспользовавшись вторым законом Кирхгофа, можно вывести для этой цепи уравнение

$$RC \frac{dU_{max}}{dt} + U_{max} = RC \frac{dU_{вх}}{dt}$$

Если обозначить $RC = T$, то получим уравнение вида (14).

Интегрирующее типовое звено. Интегрирующее ТЗ характеризуется тем, что выходной параметр определяется интегралом по времени от входного параметра или описывается зависимостью

$$\frac{dx_{max}}{dt} = kx_{вх} \quad (15)$$

где k — коэффициент передачи звена.

В качестве примера интегрирующего ТЗ рассмотрим рулевую машину (РМ). РМ представляет собой автономный электрогидравлический усилитель, предназначенный для преобразования электрического сигнала в перемещение выходного штока РМ, соединенного с корпусом рулевого сошла (рис. 5). Поршень 1, связанный через шток 2 с рычагом 3 рулевой машины, перемещается под действием перепада давления в полостях А и Б. Перепад давления создается за счет неодинакового перекрытия золотников 4 и 5, установленных в каналах нагнетания жидкости. Рабочая жидкость нагнетается шестеренным насосом 6. Золотники 4 и 5 соединены с качалкой 7 дифференциального реле 8, на центральную обмотку которого подается командное напряжение $U_{1х}$. При отсутствии командного напряжения золотники одинаково перекрывают каналы нагнетания, давления в полостях А и Б одинаковы и поршень 1 неподвижен.

При подаче командного напряжения $U_{\text{ком}}$ качалка отклоняется от нейтрального положения и проходное сечение одного из золотников увеличивается, а другого — уменьшается. При этом давление в одной из полостей (А или Б) увеличивается, а в другой — уменьшается, что приводит к возникновению перепада давления и перемещению поршня 1. Поршень 1, действуя через шток 2 и рычаг 3, поворачивает рулевое сопло 10. Угол поворота вала измеряется потенциометром обратной связи (ПОС) 9. Напряжение, снимаемое с ПОС, пропорционально углу поворота вала $\psi_{\text{полк}}$. При изменении полярности командного сигнала вал поворачивается в другую сторону.

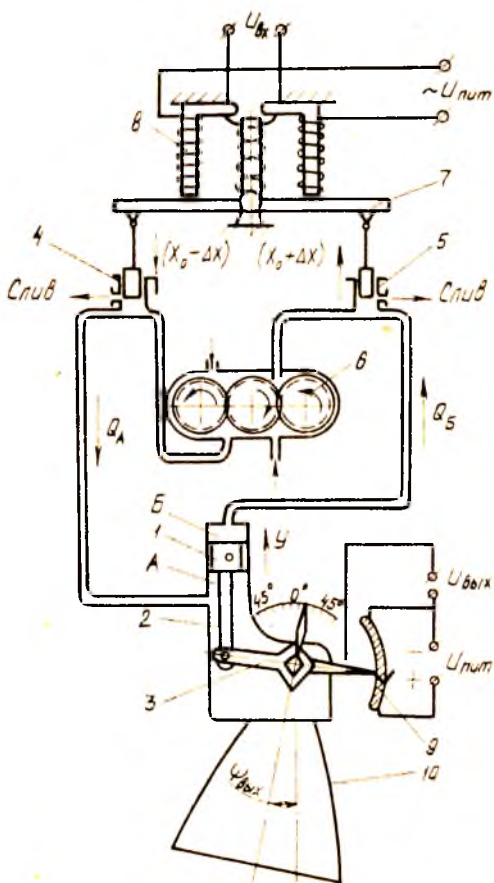


Рис. 5. Принципиальная схема рулевой машины

При выводе уравнения РМ как интегрирующего ТЗ принимается ряд упрощающих допущений: сила инерции, сила трения и сила противодействия со стороны нагрузки на поршень пренебрежимо малы по сравнению с силой давления; жидкость несжимаема. Такие допущения оправданы при небольших реализующихся на практике скоростях движения РМ. Для вывода уравнения РМ при принятых допущениях достаточно рассмотреть уравнение неразрывности

$$Q_A = Q_B = F_n \frac{dy}{dt}, \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} Q_A &= Q_n - \mu (x_0 - \Delta x) b \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_A - p_{ca})}; \\ Q_B &= \mu (x_0 + \Delta x) b \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_B - p_{ca})} - Q_n. \end{aligned} \quad (17)$$

Q_A , Q_B — объемные расходы через полости А и Б; F_n — площадь поршня; y — координата движения поршня; Q_n — производительность насоса; x_0 — координата золотника, соответствующая равновесному состоянию РМ; Δx — смещение золотника относительно нейтрального положения; b — ширина щели золотника; ρ — плотность жидкости; p_A , p_B — давление в полостях А и Б; μ — коэффициент расхода.

Имея в виду, что на равновесном режиме ($\Delta x = 0$)

$$F_n \frac{dy}{dt} = Q_A = Q_B = 0,$$

получим

$$Q_n = \mu x_0 b \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_A - p_{ca})}. \quad (18)$$

Решая совместно уравнения (16) и (17) с учетом выражения (18), будем иметь:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{\mu b \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_A - p_{ca})}}{F_n} \Delta x. \quad (19)$$

Согласно принятому допущению при смещении золотников на величину Δx происходит незначительное изменение давления p_A относительно его значения, соответствующего нейтральному положению золотников. Тогда, подставляя в числитель правой части

равенства (19) значение $\mu b \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_A - p_{ca})} = \frac{Q_n}{x_0}$, получим:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{Q_n}{F_n x_0} \Delta x. \quad (20)$$

Имея в виду, что существует однозначная связь между входным напряжением и перемещением золотинков $\Delta x = k_1 U_{\text{вх}}$, а также между ходом поршня и углом поворота сошла $\psi_{\text{вх}} = k_2 y$, можно записать уравнение (20) в виде

$$\frac{d\psi_{\text{вх}}}{dt} = k U_{\text{вх}}, \quad (21)$$

где $k = \frac{Q_0 k_1 k_2}{F_{\text{п}} x_0}$ — коэффициент передачи РМ.

Другим примером интегрирующего ТЗ является электрический двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, если за входной сигнал принять напряжение на обмотке возбуждения, а за выходной — угол поворота вала двигателя.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ САР

Цель работы: ознакомление с расчетными и экспериментальными способами исследования переходных характеристик типовых звеньев САР, приобретение навыков работы с электронными приборами.

Содержание работы:

1. Ознакомление с примерами типовых звеньев САР и способами их исследований.
2. Построение расчетных переходных характеристик ТЗ по заданным вариантам (прил. 2).
3. Изучение лабораторной установки и приемов работы на ней.
4. Экспериментальное определение переходных характеристик.
5. Оформление отчета.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

Переходная характеристика ТЗ представляет собой изменение во времени выходного параметра звена $x_{\text{вых}}(t)$ при ступенчатом входном сигнале

$$x_{\text{вх}}(t) = x_0 [1(t)] \quad (22)$$

и нулевых начальных условиях. В формуле (22) приняты обозначения: x_0 — величина ступени входного сигнала;

$1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases}$ — единичная ступенчатая функция (функция Хевисайда) (рис. 6). Переходная характеристика или переходная



Рис. 6. Ступенчатая функция

функция определяется как решение дифференциального уравнения ТЗ при ступенчатом входном сигнале.

Апериодическое ТЗ. Переходная функция этого ТЗ определяется как решение дифференциального уравнения (3). Известно, что решение неоднородного дифференциального уравнения (3) складывается

из общего решения $(x_{\text{вых}})_{\text{общ}}$ однородного уравнения

$$T \frac{dx_{\text{max}}}{dt} + x_{\text{max}} = 0 \quad (23)$$

и частного решения $(x_{\text{вых}})_{\text{част}}$ неоднородного уравнения (3)

$$x_{\text{max}}(t) = (x_{\text{max}})_{\text{общ}} + (x_{\text{max}})_{\text{част}} \quad (24)$$

Общее решение уравнения первого порядка (23) записывается в виде

$$(x_{\text{вых}})_{\text{общ}} = Ce^{rt},$$

где C — постоянная интегрирования, определяемая с использованием начальных условий; $r = -1/T$ — корень характеристического уравнения $Tr + 1 = 0$.

Частное решение $(x_{\text{вых}})_{\text{част}}$ записывается в форме правой части, т. е. $(x_{\text{вых}})_{\text{част}} = kx_0$. Тогда решение уравнения апериодического ТЗ примет вид

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_0 + Ce^{-t/T},$$

Для определения C воспользуемся нулевыми начальными условиями. При $t = 0$ имеем $0 = kx_0 + C$, или $C = -kx_0$. Подставляя значение C в выражение для $x_{\text{вых}}(t)$, получим переходную функцию апериодического ТЗ:

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_0 [1 - e^{-t/T}]. \quad (25)$$

График переходной функции апериодического ТЗ (рис. 7,а) представляет экспоненциальную нарастающую кривую. Значения $x_{\text{вых}}$ при $t = T$ и $t = \infty$ определяются, соответственно, выражениями:

$$x_{\text{вых}} = kx_0 [1 - e^{-1}] = 0,632 kx_0; \quad x_{\text{вых}} = kx_0.$$

Следовательно, постоянная времени T равна времени, в течение которого выходной параметр достигает величины 0,632 от нового установившегося значения. Чем больше постоянная времени T , тем медленнее протекает переходный процесс в ТЗ (рис. 7,б).

Обычно переходный процесс считается законченным, если $x_{\text{вых}}$ достиг 95% своего установившегося значения, т. е. $x_{\text{вых}} = 0,95 kx_0$. Это соответствует времени $t_{\text{ин}} = 3T$, т. е. переходный процесс в аperiodическом ТЗ можно считать практически законченным по истечении времени $3T$. При различных значениях коэффициента передачи K , но одинаковом T переходные характеристики отличаются лишь величиной выходного параметра, а время переходного процесса $t_{\text{ин}}$ этих звеньев одинаковое (рис. 7, в).

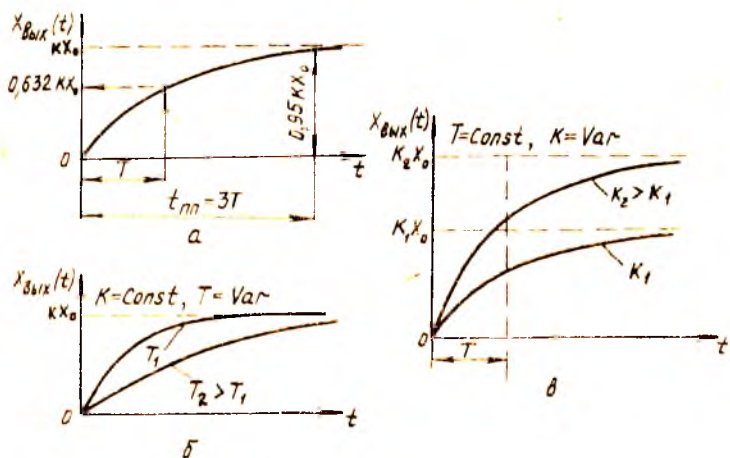


Рис. 7. Переходные характеристики аperiodического типового звена

Колебательное ТЗ. Это звено является одним из сложных ТЗ, переходная функция которого определяется из решения дифференциального уравнения второго порядка (6). Вид переходной функции определяется корнями характеристического уравнения $T^2 r^2 + 2\zeta T r + 1 = 0$:

$$r_1 = \frac{-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{T}; \quad r_2 = \frac{-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{T}$$

При значениях коэффициента демпфирования $0 < \zeta < 1$ корни будут комплексно-сопряженными:

$$r_1 = -\alpha + j\omega_c; \quad r_2 = -\alpha - j\omega_c,$$

где $\alpha = \zeta/T$ — коэффициент, характеризующий затухание колебаний в ТЗ; $\omega_c = \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{T}$ — собственная частота колебаний ТЗ; $j = \sqrt{-1}$.

После решения дифференциального уравнения (6) при $0 < \zeta < 1$ получим переходную функцию колебательного ТЗ

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_0 [1 - Be^{-\alpha t} \sin(\omega_c t + \varphi)], \quad (26)$$

где

$$B = \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega_c^2}}; \quad \varphi = \text{arctg} \frac{\alpha}{\omega_c}.$$

Из анализа переходной характеристики (рис. 8, а), построенной по формуле (26), следует, что при коэффициенте демпфирования $0 < \zeta < 1$ переходный процесс в колебательном ТЗ сопровождается затухающими колебаниями с частотой ω_c и амплитудой.

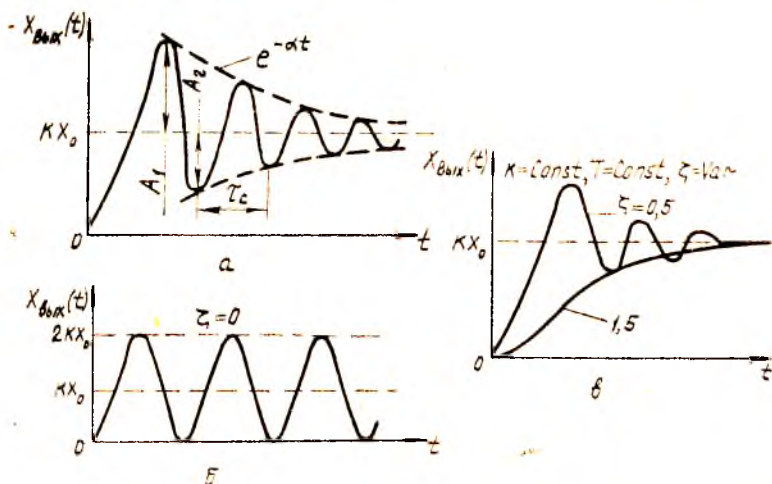


Рис. 8. Переходные характеристики колебательного типового звена

уменьшающейся по экспоненте $e^{-\alpha t}$. Промежуток времени между экстремумами, расположенными рядом с одной стороны от нового установившегося значения $x_{\text{вых}} = kx_0$, равен периоду собственных колебаний $\tau_c = 2\pi/\omega_c$. Если известен переходный процесс для колебательного ТЗ и требуется определить T и ζ , то достаточно определить τ_c и декремент затухания $\alpha\tau_c$, определяемый по величине снижения амплитуды колебаний за половину периода:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{Be^{0-\alpha\tau_c/2}}{Be^{-\alpha\tau_c/2}} = e^{\alpha\tau_c/2}. \quad (27)$$

Логарифмируя левую и правую части уравнения (27), получим:

$$\alpha = \frac{2}{\tau_c} \ln \frac{A_1}{A_2} = \frac{2}{\tau_c} 2,3 \lg \frac{A_1}{A_2}.$$

При известных a и $\omega_c = 2\pi/\tau_c$ легко определить T и ξ по формулам

$$T = \frac{1}{\sqrt{a^2 + \omega_c^2}}; \quad \xi = \frac{a}{\sqrt{a^2 + \omega_c^2}}. \quad (28)$$

При $\xi \geq 1$ переходная характеристика ТЗ не имеет колебаний и становится похожей на переходную характеристику апериодического ТЗ (рис. 8,в). Поэтому колебательное звено при $\xi \geq 1$ иногда называют аperiодическим звеном второго порядка. При отсутствии демпфирования ($\xi = 0$) колебательное ТЗ называют консервативным колебательным ТЗ. Переходный процесс в этом звене сопровождается незатухающими колебаниями (рис. 8,б). На практике всегда имеется трение и потери энергии, поэтому переходный процесс в колебательном ТЗ имеет затухающий характер.

Построение переходной характеристики колебательного ТЗ облегчается, если воспользоваться формулой (27). Имея в виду, что при $t = 0$ справедливо равенство $A_1 = kx_0$, максимальные отклонения переходной характеристики при $t = i \frac{\pi}{\omega_c}$ относительно прямой $x_{\text{вых}} = kx_0$ в соответствии с формулой (27) будут равны

$$A_i = kx_0 e^{-i\beta \frac{\pi}{2}},$$

где $i = 0; 1; 2; \dots$ — номер экстремальной точки переходной характеристики. Соединяя экстремальные точки плавной кривой, получим переходную характеристику колебательного ТЗ.

Реальное дифференцирующее ТЗ. Переходная функция реального дифференцирующего ТЗ определяется из решения дифференциального уравнения (14) при $x_{\text{вх}} = x_0 [1(t)]$ и имеет следующий вид:

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_0 e^{-t/T}. \quad (29)$$

Переходная характеристика (рис. 9,а) реального дифференцирующего ТЗ, построенная по формуле (29), представляет нисходящую экспоненциальную кривую. При $t = 0$ $x_{\text{вых}} = kx_0$, а при $t = T$ $x_{\text{вых}} = 0,368 kx_0$, т. е. постоянная времени T представляет собой время, в течение которого выходной параметр принимает величину, равную 36,8% от первоначального значения (при $t = 0$). Из анализа переходных характеристик (рис. 9,б) следует, что чем больше постоянная времени, тем медленнее протекает переходный процесс в реальном дифференцирующем ТЗ. Величина коэффициента передачи k не влияет на время переходного процесса (рис. 9,в).

Интегрирующее ТЗ. Переходная функция интегрирующего ТЗ определяется в результате интегрирования левой и правой частей дифференциального уравнения (15) при $x_{\text{вх}} = x_0 [1(t)]$ и имеет

следующий вид:

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_{0i}. \quad (30)$$

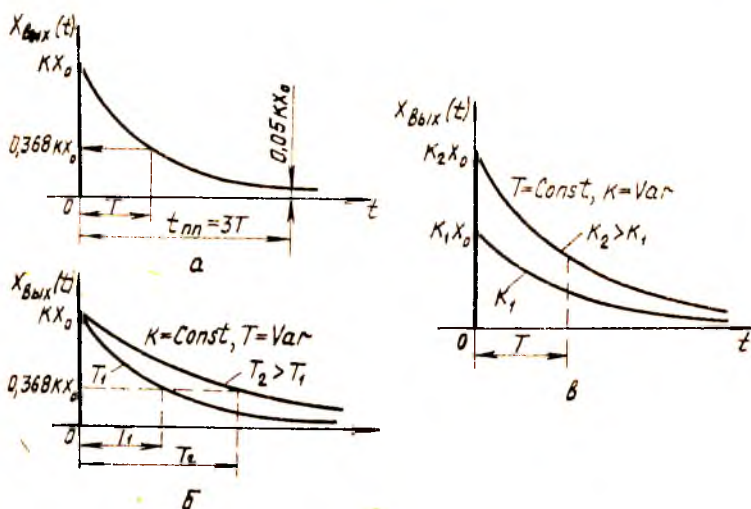


Рис. 9. Переходные характеристики реального дифференцирующего звена

Из формулы (30) следует, что переходная характеристика (рис. 10) интегрирующего ТЗ представляет собой нарастающую наклонную прямую, темп нарастания которой зависит от коэффициента передачи k . Чем больше k , тем быстрее протекает переходный процесс. В отличие от переходных характеристик других ТЗ переходная характеристика интегрирующего ТЗ не стремится к какому-либо значению, а все время имеет нарастающий характер.

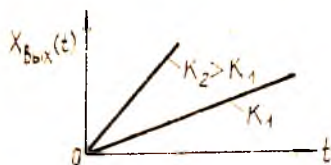


Рис. 10. Переходные характеристики интегрирующего звена

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

Экспериментальное исследование переходных характеристик ТЗ проводится с целью проверки правильности расчетных зависимостей, а также приобретения навыков экспериментального определения коэффициентов уравнений ТЗ.

Ввиду того, что наиболее просто реализуются типовые звенья в виде электрических цепей, в качестве аperiodического, колебательного и реального дифференцирующего ТЗ были использованы RC (см. рис. 1,в), $R-L-C$ (см. рис. 2,в) и CR (см. рис. 4,б) цепи.

Ступенчатый сигнал на входе в исследуемое звено задается генератором прямоугольных сигналов, а сигнал на выходе измеряется двухлучевым осциллографом (рис. 11). Частота прямоугольных сигналов ω выбирается такой, что переходный процесс в ТЗ успевает полностью закончиться. Период сигнала $\tau = 2\pi/\omega$ может быть использован для определения масштаба времени по горизонтальной оси.

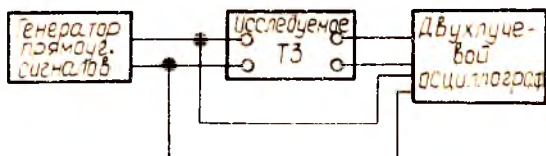


Рис. 11. Схема включения приборов при исследовании переходных характеристик типовых звеньев

Для экспериментального определения переходных характеристик звеньев необходимо:

- собрать электрическую схему (см. рис. 11);
- задать входное напряжение $U_{вх}$;
- снять с экрана осциллографа переходные характеристики;
- нанести ряд экспериментальных точек на расчетные зависимости $x_{вых}(t)$;

воспользовавшись выражениями для переходных функций и экспериментальными данными, определить коэффициенты дифференциальных уравнений ТЗ — для аperiodического ТЗ; T, ξ — для колебательного ТЗ; T — для реального дифференцирующего ТЗ; сравнить полученные коэффициенты дифференциальных уравнений с заданными их значениями.

Экспериментальное исследование характеристик интегрирующего звена проводится на примере рулевой машины (см. рис. 5). Установка (рис. 12) состоит из следующих основных блоков: рулевой машины (РМ) с поворотным соплом, пульта управления, звукового генератора низкочастотных колебаний ГЗ-16, шлейфового осциллографа П115, блока питания установки. Звуковой генератор ГЗ-16 используется при исследовании частотных характеристик РМ (лаб. работа № 2). На пульте управления установлены тумблеры включения мотора шестеренного насоса, тумблер подачи

напряжения $U_{вх}$ в обмотку управления поляризованного реле при определении переходных характеристик; переключатель, которым устанавливается величина входного напряжения; тумблер включения обратной связи (используется при исследовании соединений звеньев с обратной связью); переключатель для изменения величины коэффициента обратной связи. Шлейфовый осциллограф Н115 позволяет записывать на ультратрафолетовую бумагу переходные процессы и гармонические сигналы по входному напряжению и углу поворота $\Psi_{вых}$ сопла. Блок питания является источником постоянного напряжения в 27 В для мотора РМ, обмотки управления и потенциометра обратной связи.

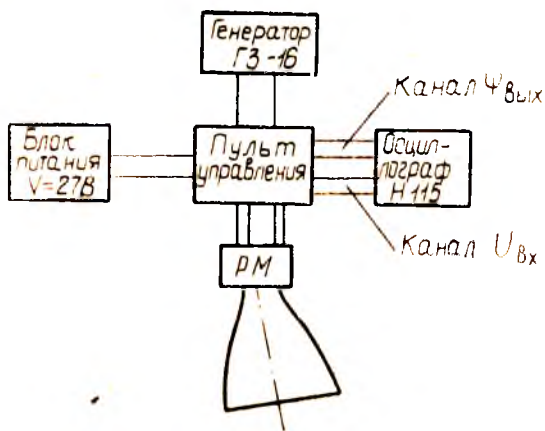


Рис. 12. Блок-схема соединения приборов при исследовании переходных и частотных характеристик рулевой машины как интегрирующего типового звена

Для определения переходных характеристик РМ необходимо выполнить следующее.

1. Тумблер «Обратная связь» установить в нейтральное положение.

2. Переключатель, с помощью которого задается величина входного напряжения $U_{вх}$, установить в положение 3 (4, 5), что соответствует $U_{вх} = 0,45$ В (0,9 В; 1, 2 В) в зависимости от заданного варианта.

3. Произвести калибровку каналов осциллографа Н115. Для этого по каналу $U_{вх}$ подается известное калибровочное напряжение, а по каналу $\Psi_{вых}$ записываются сигналы, соответствующие двум заданным углам, например $\Psi_{вых} = 0$ и $\Psi_{вых} = 30^\circ$. Скорость

протяжки бумаги на осциллографе при калибровке и снятии переходных характеристик — 25 мм/с.

4. Установить сопло в нейтральное положение ($\varphi_{\text{вых}} = 0$), включить на пульте осциллографа тумблер «Двигатель», а на пульте управления — «Мотор». Включить на пульте осциллографа тумблер «Съемка» и через 1 с включить на пульте управления тумблер «Качание сопла». Переходный процесс записать на осциллограф до достижения $\varphi_{\text{вых}} = 45^\circ$.

5. Нанести ряд экспериментальных точек $\varphi_{\text{вых}}(t)$ на теоретическую зависимость. Воспользовавшись экспериментальными данными и переходной функцией для РМ как интегрирующего ТЗ, определить экспериментальный коэффициент k .

Содержание отчета

1. Схемы и дифференциальные уравнения ТЗ. Их решение.
2. Блок-схема лабораторной установки и методика проведения лабораторной работы.
3. Расчетные и экспериментальные графики переходных характеристик ТЗ (прил. 1).
4. Выводы.

Контрольные вопросы

1. Каковы общие признаки ТЗ?
2. Привести примеры аperiodических ТЗ.
3. Как получают дифференциальные уравнения ТЗ?
4. Какова физическая сущность коэффициентов дифференциальных уравнений?
5. Какова цель и порядок проведения лабораторной работы?
6. Как производится обработка полученных экспериментальных данных?
7. Как изобразить (качественно) переходную характеристику колебательного ТЗ с коэффициентами $T = 0,1$ с; $k = 2$; $\zeta = 0,3$?
8. Как определить по переходной характеристике коэффициенты дифференциального уравнения?
9. Как влияют величины элементов звена (R, L, C) на характер переходного процесса?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ САР

Цель работы: ознакомление с расчетными и экспериментальными способами исследования типовых звеньев САР, приобретение навыков проведения частотных испытаний САР.

Содержание работы:

1. Ознакомление с принципами получения частотных характеристик САР.
2. Построение частотных характеристик ТЗ аналитическим способом по заданным вариантам (см. прил. 2).
3. Изучение лабораторной установки и приемов работы на ней.
4. Экспериментальное получение частотных характеристик ТЗ.
5. Оформление отчета.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

Частотные характеристики ТЗ получают при гармоническом входном воздействии, заданном либо в тригонометрической форме

$$x_{вх}(t) = A_{вх} \sin(\omega t + \varphi_{вх}),$$

либо в экспоненциальной форме

$$x_{вх}(t) = A_{вх} e^{j(\omega t + \varphi_{вх})},$$

где $A_{вх}$ — амплитуда; ω — круговая частота; $\varphi_{вх}$ — начальная фаза входного сигнала; $j = \sqrt{-1}$.

При этом выходной сигнал изменяется также по гармоническому закону (рис. 13) с той же частотой ω , но с другой амплитудой $A_{\text{ВЫХ}}$ и начальной фазой $\varphi_{\text{ВЫХ}}$:

$$x_{\text{ВЫХ}}(t) = A_{\text{ВЫХ}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{ВЫХ}}),$$

или

$$x_{\text{ВЫХ}}(t) = A_{\text{ВЫХ}} e^{j(\omega t + \varphi_{\text{ВЫХ}})}.$$

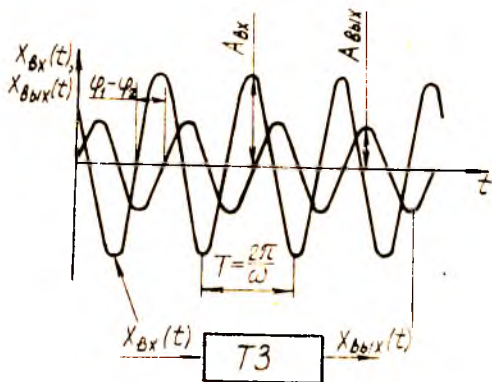


Рис. 13. Оциллограмма колебаний входного и выходного параметров ТЗ при определении его частотных характеристик

Зависимость отношения комплексной амплитуды $A_{\text{ВЫХ}} e^{j\varphi_{\text{ВЫХ}}}$ выходного сигнала к комплексной амплитуде $A_{\text{ВХ}} e^{j\varphi_{\text{ВХ}}}$ входного сигнала от частоты колебаний называют частотной функцией, которая будет

$$W(j\omega) = \frac{A_{\text{ВЫХ}} e^{j\varphi_{\text{ВЫХ}}}}{A_{\text{ВХ}} e^{j\varphi_{\text{ВХ}}}} = M(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

где $M(\omega) = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{A_{\text{ВХ}}}$ — модуль частотной функции или амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);

$\varphi(\omega) = \varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}}$ — аргумент частотной функции, или фазо-частотная характеристика (ФЧХ).

Частотная характеристика ТЗ может быть представлена на комплексной плоскости, если предварительно представить частотную функцию в виде

$$W(j\omega) = \text{Re } W + j \text{Im } W,$$

где $\text{Re } W = M(\omega) \cos \varphi(\omega)$ — действительная часть частотной функции;

$\text{Im } W = M(\omega) \sin \varphi(\omega)$ — мнимая часть частотной функции.

Частотная характеристика ТЗ на комплексной плоскости называется амплитудно-фазо-частотной характеристикой (АФЧХ) типового звена. Частотная функция ТЗ может быть получена из выражения для его передаточной функции $W(s)$, представляющей собой отношение изображений по Лапласу выходной величины $\bar{x}_{\text{вых}}$ и входной величины $\bar{x}_{\text{вх}}$ при нулевых начальных условиях

$$W(s) = \frac{\bar{x}_{\text{вых}}}{\bar{x}_{\text{вх}}}$$

где s — оператор Лапласа.

Для получения передаточной функции ТЗ достаточно в дифференциальном уравнении звена произвести замену операции дифференцирования d/dt на оператор Лапласа s входную $x_{\text{вх}}$ и выходную $x_{\text{вых}}$ величины, представить их изображениями по Лапласу $\bar{x}_{\text{вх}}$, $\bar{x}_{\text{вых}}$ и решить это уравнение относительно $\frac{\bar{x}_{\text{вых}}}{\bar{x}_{\text{вх}}}$. Если в выражении для $W(s)$ заменить s на $j\omega$, то получим частотную функцию $W(j\omega)$ звена.

Теоретическое исследование частотных характеристик ТЗ связано с приведением дифференциальных уравнений ТЗ к записи их в операторной форме, определением и анализом передаточной и частотной функций звеньев.

Апериодическое ТЗ. Дифференциальное уравнение (3) этого звена, записанное в операторной форме, имеет вид

$$(Ts + 1)\bar{x}_{\text{вых}} = k\bar{x}_{\text{вх}}$$

Решив его относительно $\frac{\bar{x}_{\text{вых}}}{\bar{x}_{\text{вх}}}$, получим выражение для передаточной функции аperiодического ТЗ:

$$W(s) = \frac{\bar{x}_{\text{вых}}}{\bar{x}_{\text{вх}}} = \frac{k}{Ts + 1} \quad (31)$$

Заменив в соотношении (31) s на $j\omega$, получим выражение для частотной функции аperiодического ТЗ:

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 + jT\omega} \quad (32)$$

Умножив числитель и знаменатель правой части равенства (32) на комплексно-сопряженное выражение знаменателя $(1 - jT\omega)$ и преобразовав ее, получим:

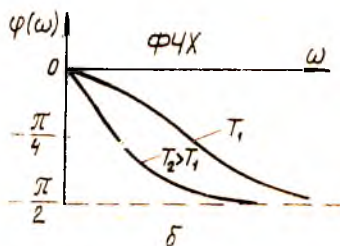
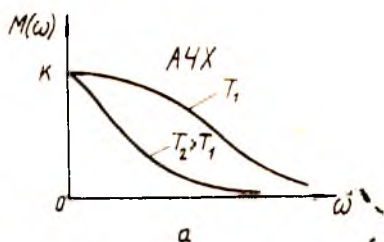
$$W(j\omega) = \text{Re } W + j \text{Im } W = \frac{k}{1 + T^2\omega^2} - j \frac{kT\omega}{1 + T^2\omega^2}$$

Тогда АЧХ и ФЧХ будут определяться из выражений

$$M(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2 W + \text{Im}^2 W} = \frac{k}{1 + T^2\omega^2} \quad (33)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{Im W}{Re W} = \text{arctg}(-\omega T). \quad (34)$$

Из формулы (33) для АЧХ апериодического ТЗ следует, что с увеличением частоты колебаний величина $M(\omega)$ уменьшается, что характеризует уменьшение $A_{\text{вых}}$, при $A_{\text{вх}} = \text{const}$. Апериодическое ТЗ обладает свойством низкочастотного фильтра: хорошо пропускает сигналы низких частот и плохо — сигналы высоких частот колебаний (рис. 14, а). Из ФЧХ апериодического ТЗ (рис. 14, б) ясно, что выходные колебания отстают по фазе от входных колебаний тем больше, чем больше частота колебаний. При $\omega \rightarrow \infty$ амплитуда $A_{\text{вых}}$ стремится к нулю, а $\varphi(\omega) \rightarrow -\pi/2$.



АФЧХ типового звена можно построить с использованием выражений как для $Re W$ и $Im W$, так и для $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$. При построении АФЧХ по $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для каждой частоты ω проводят от начала координат прямую под углом $\varphi(\omega)$ и откладывают на прямой отрезок, равный $M(\omega)$. Концы отрезков прямых, проведенных для разных частот, соединяют плавной кривой и, таким образом, получают АФЧХ звена. На АФЧХ проводят стрелку, указывающую направление движения вдоль кривой АФЧХ, соответствующее увеличению частоты колебаний. АФЧХ апериодического ТЗ представляет собой полуокружность в IV квадранте комплексной плоскости (рис. 14, в).

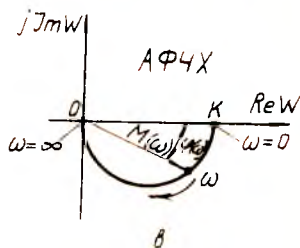


Рис. 14. Частотные характеристики апериодического типового звена

Колебательное ТЗ. Дифференциальное уравнение (6) колебательного ТЗ, записанное в операторной форме, имеет вид

$$(T^2 s^2 + 2T \zeta s + 1) \tilde{x}_{\text{вых}} = k \tilde{x}_{\text{вх}}.$$

Передаточная и частотные функции определяются соотношениями

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2T \zeta s + 1};$$

$$W(j\omega) = \frac{k}{(1 - T^2 \omega^2) + j2T\zeta\omega} \quad (35)$$

Модуль и аргумент частотной функции, полученные из выражения (35), имеют вид

$$M(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2T\zeta\omega)^2}}; \quad (36)$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left(-\frac{2T\zeta\omega}{1 - T^2 \omega^2} \right). \quad (37)$$

При значениях коэффициента демпфирования $0 < \zeta < \sqrt{2}/2$ АЧХ колебательного ТЗ представляет собой резонансную кривую (рис. 15,а). Резонансная частота колебаний определяется по формуле

$$\omega_p = \frac{\sqrt{1 - 2\zeta^2}}{T}.$$

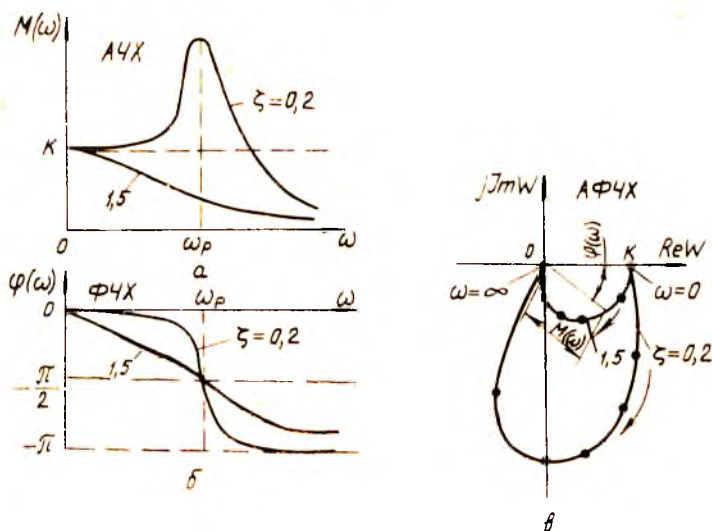


Рис. 15. Частотные характеристики колебательного второго звена

При $\zeta \geq \sqrt{2}/2$ АЧХ колебательного ТЗ представляет собой кривую, похожую на АЧХ апериодического ТЗ. С увеличением частоты колебаний ($\omega \rightarrow \infty$) амплитуда колебаний на выходе из колебательного ТЗ стремится к нулю, а фаза выходного сигнала будет отставать от фазы входного на угол $-\pi$ (рис. 15,б). В консервативном колебательном ТЗ ($\zeta = 0$) на ω_p происходит резкая

смена фазы выходного сигнала на угол $-\pi$. АФЧХ колебательно-го ТЗ располагается в IV и III квадратах комплексной плоскости, как показано на рис. 15.в.

Реальное дифференцирующее ТЗ. Операторное уравнение реального дифференцирующего ТЗ в соответствии с формулой (14) имеет вид

$$(Ts + 1)\bar{x}_{\text{вых}} = kTs\bar{x}_{\text{вх}}.$$

Передаточная и частотная функции определяются равенствами

$$W(s) = \frac{kTs}{Ts + 1};$$

$$W(j\omega) = \frac{jkT\omega}{1 + jT\omega}. \quad (38)$$

АЧХ и ФЧХ, определенные из соотношения (38), имеют вид

$$M(\omega) = \frac{kT\omega}{\sqrt{1 + T^2\omega^2}}; \quad (39)$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{1}{T\omega}. \quad (40)$$

АЧХ реального дифференцирующего звена (рис. 16.а) имеет вид нарастающей кривой, что указывает на то, что это звено обладает свойством фильтра высоких частот: хорошо пропускает колебания высоких частот и плохо — колебания низких частот. Сдвиг по фазе ($\varphi_{\text{max}} - \varphi_{\text{вх}}$) при изменении частоты колебаний от нуля до бесконечности уменьшается от $\pi/2$ до нуля (рис. 16.б). АФЧХ ре-

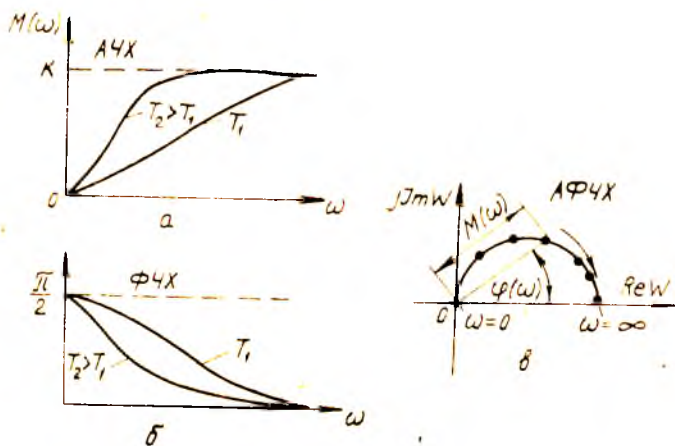


Рис. 16. Частотные характеристики реального дифференцирующего типового звена

ального дифференцирующего ТЗ представляет собой полуокружность, расположенную в первом квадранте (рис. 16.в).

Интегрирующее ТЗ. Операторное уравнение интегрирующего ТЗ в соответствии с уравнением (15) имеет вид

$$s \tilde{x}_{\text{вых}} = k \tilde{x}_{\text{вх}}.$$

Передающая и частотная функции определяются выражениями

$$W(s) = \frac{k}{s};$$

$$W(j\omega) = -j \frac{k}{\omega}. \quad (41)$$

АЧХ и ФЧХ интегрирующего звена строятся в соответствии с выражениями

$$M(\omega) = \frac{k}{\omega}; \quad (42)$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg} \left(\frac{k}{0} \right) = -\frac{\pi}{2}. \quad (43)$$

Как следует из формулы (42), АЧХ интегрирующего звена представляет собой гиперболу (рис. 17.а). Чем выше частота колебаний, тем меньше амплитуда колебаний выходного сигнала. При

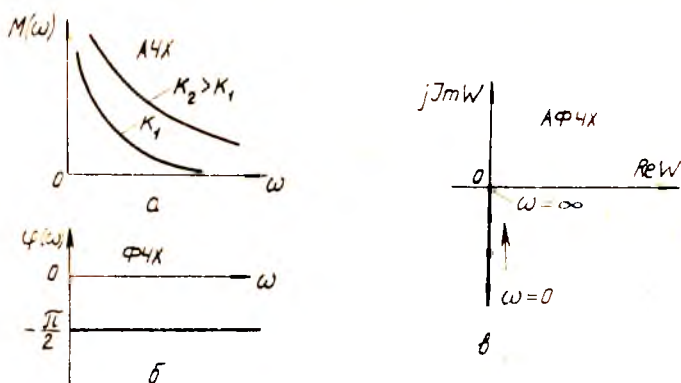


Рис. 17. Частотные характеристики интегрирующего типового звена

$\omega = 0$ амплитуда выходного сигнала равна бесконечности. Начальная фаза выходных колебаний отстает от начальной фазы входных колебаний на угол $-\pi/2$ и не зависит от частоты колебаний (рис. 17.б). АФЧХ интегрирующего ТЗ совпадает с отрицательной частью оси ординат (рис. 17.в). Точка, соответствующая $\omega = \infty$, расположена в начале координат.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЗ

Экспериментальное исследование частотных характеристик ТЗ проводится с целью проверки правильности расчетных характеристик, а также экспериментального определения коэффициентов уравнений ТЗ. Типовыми звеньями при исследовании частотных характеристик являются те же звенья, которые использовались при исследовании переходных характеристик (см. лаб. работу № 1).

На вход в аperiodическое, колебательное, реальное дифференцирующее ТЗ (электрические цепи) задаются колебания напряжения от звукового генератора колебаний. Амплитуды входного ($A_{вх}$) и выходного ($A_{вых}$) сигналов измеряются вольтметрами, а сдвиг по фазе — фазометром.

Для экспериментального определения частотных характеристик ТЗ необходимо:

собрать электрическую схему (рис. 18);

задать входное напряжение и снять показания вольтметров и фазометра для различных частот из заданного диапазона;

по полученным данным нанести экспериментальные точки на расчетные зависимости $M(\omega)$, $\varphi(\omega)$, $W(j\omega)$. Воспользовавшись выражениями для $M(\omega)$, $\varphi(\omega)$ и экспериментальными данными, определить коэффициенты уравнений: T — для аperiodического ТЗ; T, ζ — для колебательного ТЗ; T — для реального дифференцирующего ТЗ.

Экспериментальное исследование частотных характеристик интегрирующего ТЗ проводится на примере электрогидравлического привода (описание см. в лаб. работе № 1, рис. 12). Для определения и исследования частотных характеристик РМ необходимо выполнить следующее:

1. Включить генератор гармонических напряжений ГЗ-16, прогреть прибор 10–15 мин, сбалансировать выходные усилители генератора.

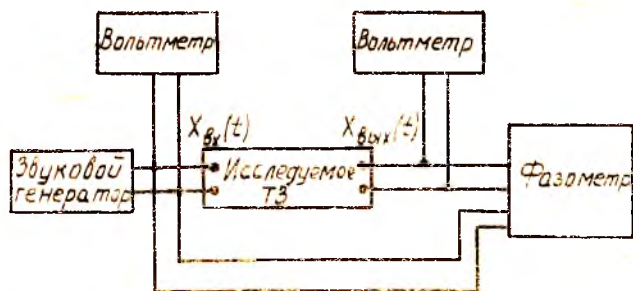


Рис. 18. Схема включения приборов при исследовании частотных характеристик типовых звеньев

2. Тумблер «Обратная связь» на пульте управления установить в нейтральное положение.

3. Произвести калибровку каналов ($U_{вх}$, $\Psi_{вых}$) осциллографа П115. Для этого по каналу $U_{вх}$ подается известное калибровочное напряжение, а по каналу $\Psi_{вых}$ записываются сигналы, соответствующие двум заданным углам, например, $\Psi_{вых} = 0$ и $\Psi_{вых} = 30^\circ$. Скорость протяжки бумаги на осциллографе при калибровке и снятии частотных характеристик 25 мм/с.

4. Клеммы на пульте подсоединить к выходу генератора ГЗ-16, установить частоту 0,2 Гц и медленно увеличить напряжение на выходе из генератора до заданной величины.

5. Установить сопло РМ в нейтральное положение, включить на пульте осциллографа тумблер «Двигатель», а на пульте управления — «Мотор».

6. Включить на пульте осциллографа тумблер «Съемка» и записать при каждой частоте (0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 Гц) по 3—4 периода колебаний $U_{вх}$, $\Psi_{вых}$.

Обработав полученную осциллограмму, получить ряд экспериментальных точек $M(\omega) = \frac{\Delta \Psi_{вых}}{\Delta U_{вх}}$, которые следует нанести на теоретические зависимости. Воспользовавшись экспериментальными данными (для одной точки), определить коэффициент передачи k и сравнить его с заданным значением.

Содержание отчета

1. Схемы, передаточные и частотные функции звеньев, выражения для расчета АЧХ и ФЧХ звеньев.

2. Блок-схема лабораторной установки и методика проведения частотных испытаний.

3. Расчетные и экспериментальные графики АЧХ, ФЧХ и АФЧХ для каждого ТЗ (см. прил. 1).

4. Выводы. Оценка расхождения теоретических и экспериментальных зависимостей.

Контрольные вопросы

1. Как получить частотные функции звеньев расчетным путем?

2. Что такое передаточная функция?

3. Как деформируются графики частотных характеристик при изменении параметров R , L , C электрической цепи?

4. Как определяются коэффициенты дифференциальных уравнений по графикам частотных характеристик?

5. В чем заключается преимущество и недостаток частотного метода экспериментального определения коэффициентов диффе-

ренциальных уравнений ТЗ по сравнению с методом переходных характеристик?

6. Каков порядок построения частотных характеристик, если дано дифференциальное уравнение звена и численные значения коэффициентов уравнения?

7. В чем заключается методика проведения частотных испытаний?

Литература

1. Ивашенко Н. И. Автоматическое регулирование. М.: Машиностроение, 1978. 736 с.
2. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. М.: Наука, 1978. 432 с.
3. Черкасов Б. А. Автоматика и регулирование воздушно-реактивных двигателей. М.: Машиностроение, 1974. 379 с.
4. Автоматика двигателей летательных аппаратов: Учебное пособие. Под редакцией Шорина В. П. Куйбышев: КудПИ, 1978. 68 с.

РАСЧЕТНЫЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ГРАФИКИ

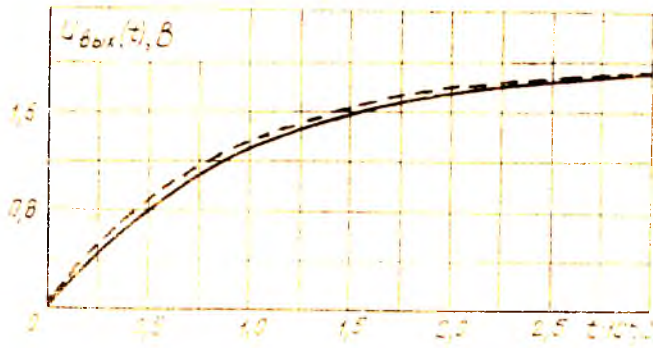


Рис. П1. Переходная характеристика апериодического типового звена: $k = 1$; $T = 0,01$ с; $U_{00} = 2$ В;
 ———— теория; ————— эксперимент

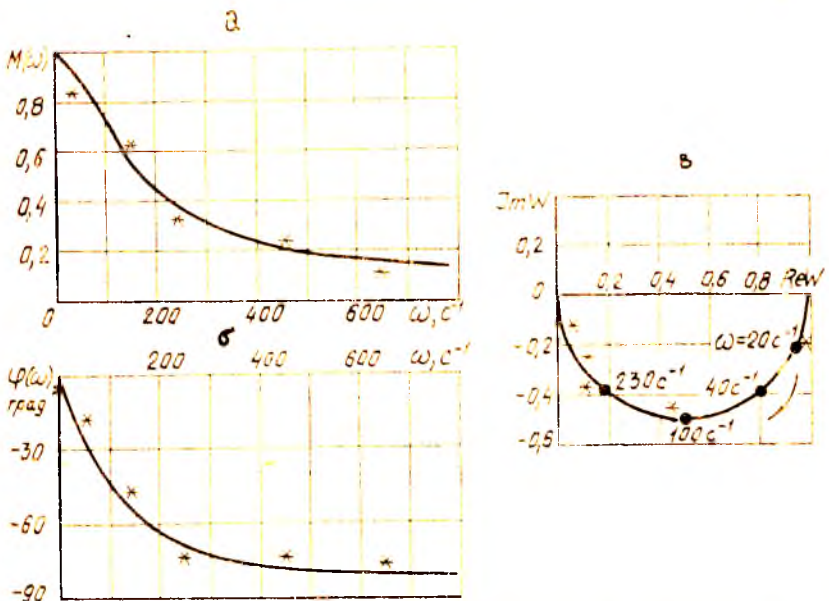


Рис. П2. Частотные характеристики апериодического типового звена: $k = 1$; $T = 0,01$ с. а — МЧХ; б — ФЧХ; в — ЛФЧХ; ———— теория; * — эксперимент

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫХ ЗВЕНЬЕВ

Аперiodическое ТЗ $k = 1$, $U_0 = 3$ В

Параметры	Варианты					
	I	II	III	IV	V	VI
T , с	$0,15 \cdot 10^{-3}$	$0,82 \cdot 10^{-3}$	$0,96 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$1,79 \cdot 10^{-3}$	$1,93 \cdot 10^{-3}$
* f_{max} , Гц	1500	1500	1200	1000	800	500

Колебательное ТЗ $k = 1$, $U_0 = 3$ В

Параметры	Варианты					
	I	II	III	IV	V	VI
T , с	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$4,3 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$
ζ	0,09	0,14	0,11	0,08	0,06	0,06
* f_{max} , Гц	500	600	800	1000	1000	1000

Реальное дифференцирующее ТЗ $k = 1$, $U_0 = 3$ В

Параметры	Варианты					
	I	II	III	IV	V	VI
T , с	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$
* f_{max} , Гц	500	450	380	320	280	230

* Верхний предел диапазона частот, в котором следует строить частотные характеристики.

СОДЕРЖАНИЕ

Теоретические основы лабораторных работ	1
Лабораторная работа № 1	11
Лабораторная работа № 2	20
Литература	29
Приложение 1	30
Приложение 2	31

Составители: *Асият Газизитовна Гимадиева,*
Александр Георгиевич Котов

Исследование переходных и частотных
характеристик типовых звеньев САП

Методические указания
к лабораторным работам 1 и 2

Редактор М. Н. Логунов и
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор Н. С. Куприянова

Сдано в набор 19.05.83 г. Подписано в печать 24.06.83 г.
Формат 60 × 84 1/16. Бумага оберточная белая.
Гарнитура литературная. Высокая печать.
Усл. п. л. 1,86. Уч.-изд. л. 4,75. Заказ 439. Т. 600.
Бесплатно.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт им. С. П. Королёва,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Типография УЭЗ Куйбышевского авиационного института, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.