

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Кафедра радиотехнических систем

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ

Методические указания
к лабораторной работе по курсу «Радиоавтоматика» для студентов
специальностей 1-39 01 01 «Радиотехника», 1-39 01 02 «Радиоэлектронные
системы» и курсу «Автоматика информационных систем» для студентов спе-
циальности 1-39 01 03 «Радиоинформатика»

Минск 2005

УДК 681.5 (075.8)

ББК 32.965 я 73

И 88

И 88 **Исследование** линейной модели следящей системы: Метод. указ. к лаб. работе по курсу «Радиоавтоматика» для студ. спец. 1-39 01 01 «Радиотехника», 1-39 01 02 «Радиоэлектронные системы» и курсу «Автоматика информационных систем» для студ. спец. 1-39 01 03 «Радиоинформатика»/ Сост. С.А. Ганкевич, Г.Н. Демидович. – Мн.: БГУИР, 2005. – 30 с.: ил.

В методических указаниях рассмотрены принципы построения радиоэлектронной следящей системы с управлением по рассогласованию и ее математическое описание, изложены методы анализа точности, быстродействия и устойчивости линейной следящей системы. Даны указания по выполнению лабораторной работы. Приведены вопросы для самопроверки.

© Ганкевич С.А., Демидович Г.Н.,
составление, 2005

© БГУИР, 2005

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель работы
2. Краткие теоретические сведения
 - 2.1. Принципы построения следящей системы и ее математическое описание
 - 2.2. Установившийся режим работы ЛСС и характеристики точности
 - 2.3. Переходный режим работы ЛСС и его характеристики
 - 2.4. Устойчивость ЛСС
3. Описание исследуемых моделей
4. Динамические звенья, используемые в качестве фильтров
5. Установка, запуск и порядок работы с программой
6. Методика исследований
7. Содержание и порядок выполнения работы
8. Содержание отчета
9. Контрольные вопросы
- Литература

Библиотека БГУИР

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование процессов, протекающих в линейных непрерывных радиоэлектронных следящих системах, определение характеристик переходного и установившегося режимов работы систем при типовых входных воздействиях, а также анализ устойчивости замкнутой системы по годографу, ЛАЧХ и ЛФЧХ системы в разомкнутом состоянии.

2. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

2.1. Принципы построения следящей системы и ее математическое описание

В любой следящей системе можно выделить типовые по назначению функциональные элементы (рис.1). Каждый элемент характеризуется зависимостью выходной величины от входной. Характер зависимости и ее математическое выражение определяют тип элемента, характеризуют его в установившемся режиме (статическая характеристика) и в переходном режиме (динамическая характеристика). Если статические характеристики всех звеньев системы определяются линейными алгебраическими, а динамические – линейными дифференциальными уравнениями, такая система относится к классу линейных следящих систем (ЛСС) и в целом описывается линейным дифференциальным уравнением.

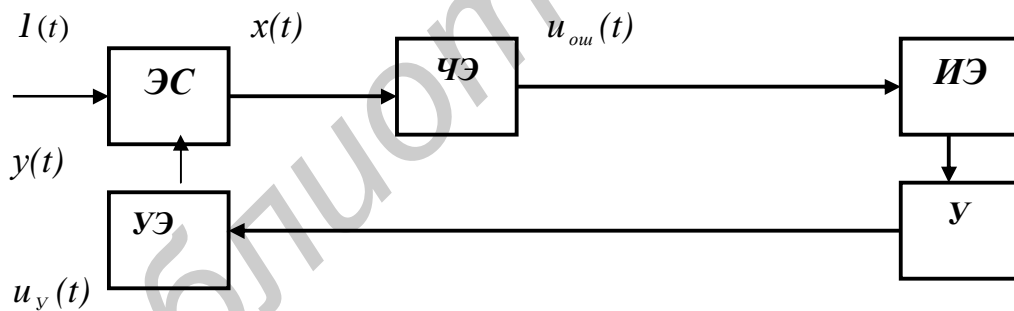


Рис. 1. Обобщенная функциональная схема следящей системы:

Д – дискриминатор; ЭС – элемент сравнения; ЧЭ – чувствительный элемент; ИЭ – инерционный элемент; У – управитель; УЭ – управляемый элемент

Исследуемая модель ЛСС построена в соответствии с принципом управления по рассогласованию $x(t)$ выходной (управляемой) величины $y(t)$ и входного (задающего) воздействия $\lambda(t)$. Величины $\lambda(t)$ и $y(t)$ в системах радиоавтоматики являются параметрами соответственно входного и выходного радиосигналов: амплитудой, частотой, фазой, временной задержкой, направлением прихода радиосигнала. Следящая система осуществляет слежение за величиной параметра $\lambda(t)$ входного радиосигнала $U_{ex} [t, \lambda(t)]$. При этом она должна выполнять три основные функции:

а) формировать управляемую величину $y(t)$ (оценку задающего воздействия $\lambda(t)$) и обеспечивать ее изменение в соответствии с изменением сигнала управления $U_y(t)$;

б) производить сравнение величин $\lambda(t)$ и $y(t)$ и определять их рассогласование $x(t) = \lambda(t) - y(t)$;

в) формировать сигнал ошибки, являющийся функцией рассогласования $U_{ouu}(t) = F[x(t)]$, и преобразовывать сигнал ошибки $U_{ouu}(t)$ в сигнал управления $U_y(t)$.

Схема, отображающая перечисленные функции (см. рис. 1), называется обобщенной функциональной схемой следящей системы. Функциональная зависимость $U_{ouu}(t) = F[x(t)]$ сигнала ошибки от величины рассогласования получила название дискриминационной характеристики (ДХ), а устройство, осуществляющее такое преобразование, называется дискриминатором (Д). Он включает в себя два функциональных элемента: элемент сравнения (ЭС), отображающий операцию измерения рассогласования по параметру слежения $x(t) = \lambda(t) - y(t)$, и чувствительный элемент (ЧЭ), преобразующий величину $x(t)$ в другую физическую величину, удобную для последующих преобразований. Наиболее часто такой величиной является напряжение.

$U_{ouu}(t)$ является величиной случайной, содержит детерминированную составляющую $F(x)$ и флюктуационную составляющую $\xi(t, x)$. Дискриминационная характеристика устанавливает связь между величиной x и средним значением (математическим ожиданием) сигнала ошибки $M[U_{ouu}(t)] = F(x)$.

Инерционный элемент (ИЭ), часто реализуемый в виде ФНЧ, предназначен для сглаживания флюктуаций сигнала $U_{ouu}(t)$ и улучшения точностных показателей качества слежения. Он определяет запаздывание реакции системы на изменение входного воздействия, если остальные функциональные элементы системы являются безынерционными.

Управитель (У) выполняет функцию преобразования сигнала ошибки, поступающего с выхода ИЭ, в сигнал управления $U_y(t)$. Этот сигнал в управляемом элементе (УЭ) преобразовывается в величину выходного параметра $y(t)$. Функциональная зависимость, в соответствии с которой осуществляется такое преобразование, называется характеристикой управления. Если она линейна, а УЭ безынерционен, то характер изменения параметра $y(t)$ во времени полностью соответствует характеру изменения управляющего сигнала $U_y(t)$.

Каждый элемент рассмотренной схемы имеет передаточную характеристику, зная которую, можно по известному воздействию на его входе найти выходную величину.

Характеристиками процесса передачи входных воздействий на выход служат:

- во временной области: переходная функция – отклик системы на единичную ступенчатую функцию изменения параметра на входе; весовая функция – отклик на единичную дельта-функцию; передаточная функция – отношение изображений по Лапласу выходной величины и входного воздей-

ствия при нулевых начальных условиях ; операторный коэффициент передачи, определяемый отношением выходной и входной величин как функций времени (операторный коэффициент передачи упрощает запись дифференциального уравнения и формально совпадает с выражением для передаточной функции);

- в частотной области: частотная передаточная функция – отношение установившейся реакции системы на гармоническое входное воздействие к величине этого воздействия.

Обобщенная функциональная схема следящей системы может не содержать отдельных функциональных элементов, если в реальной системе, которую она представляет, отсутствуют те или иные функциональные преобразования.

Обобщенная функциональная схема радиотехнической следящей системы приведена на рис. 2 и состоит из дискриминатора Дис., фильтра Ф и опорного (подстраиваемого) генератора ГОС. На вход поступает смесь сигнала и шума:

$$U_{ex}(t) = U_c(t, I) + U_{iu}(t).$$

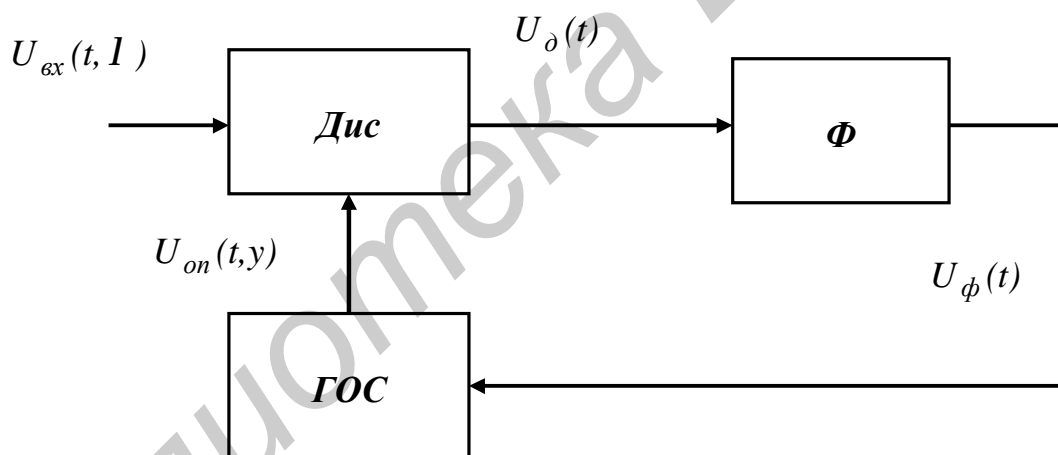


Рис. 2 . Обобщенная функциональная схема радиотехнической следящей системы

Одним из параметров сигнала является задающее воздействие $\lambda(t)$.

ГОС генерирует сигнал, одним из параметров которого является оценка отслеживаемого параметра. Выходной сигнал ГОС зависит от назначения системы.

В результате нелинейного преобразования входного и опорного сигналов в дискриминаторе формируется напряжение, пропорциональное разности

$$x = I - y,$$

где λ – задающее воздействие;

y – управляемая величина.

Напряжение на выходе дискриминатора:

$$U_{\delta}(t) = F(x) + x(t, x),$$

где $F(x)$ – зависимость среднего значения напряжения на выходе дискриминатора от ошибки слежения, называемая **дискриминационной характеристикой (ДХ)**;

$\xi(t, x)$ – флюктуационная составляющая (результат нелинейного преобразования опорного и входного сигналов в дискриминаторе).

Форма дискриминационной характеристики приведена на рис. 3. При малых значениях ошибки слежения x дискриминационная характеристика может быть аппроксимирована линейной зависимостью

$$F(x) = S_{\delta} \cdot x,$$

где

$$S_{\delta} = \frac{dF(x)}{dx} / x=0.$$

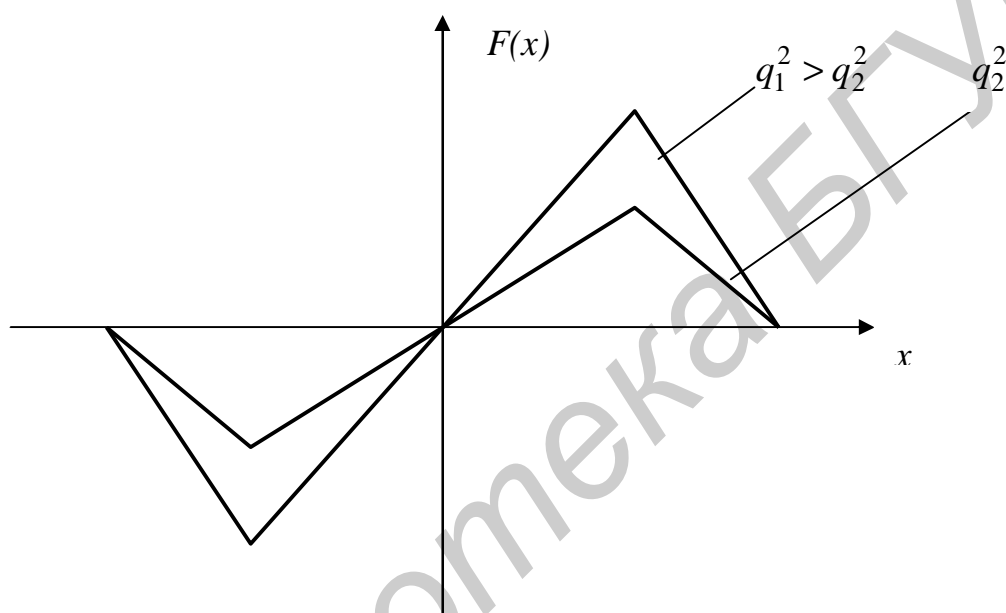


Рис. 3. Форма дискриминационной характеристики

Здесь S_{δ} – крутизна, зависящая от типа дискриминатора, отношения сигнал/шум на входе, амплитуды сигнала и других факторов.

$$q^2 = \frac{P_c}{\sigma_{ш}^2},$$

где P_c – мощность сигнала;
 $\sigma_{ш}^2$ – дисперсия шума;

$$q_1^2 > q_2^2.$$

Для исключения зависимости крутизны ДХ от амплитуды входного сигнала производят его ограничение или автоматическую регулировку усиления (АРУ). Дискриминационная характеристика имеет ограниченный размах по оси x . Если ошибка превышает граничную, обратная связь размыкается и система выходит из режима слежения ($x > |x_2|$). Для ввода в синхронизм используется устройство ввода, обеспечивающее $x < |x_2|$.

Фильтр осуществляет сглаживание высокочастотных составляющих. Он может содержать интегрирующие звенья, его передаточная функция определяет качественные характеристики системы.

Математическую модель системы можно представить в виде структурной схемы. Под ней мы будем понимать схему, каждое звено которой определяет соответствующую математическую операцию (рис. 4).

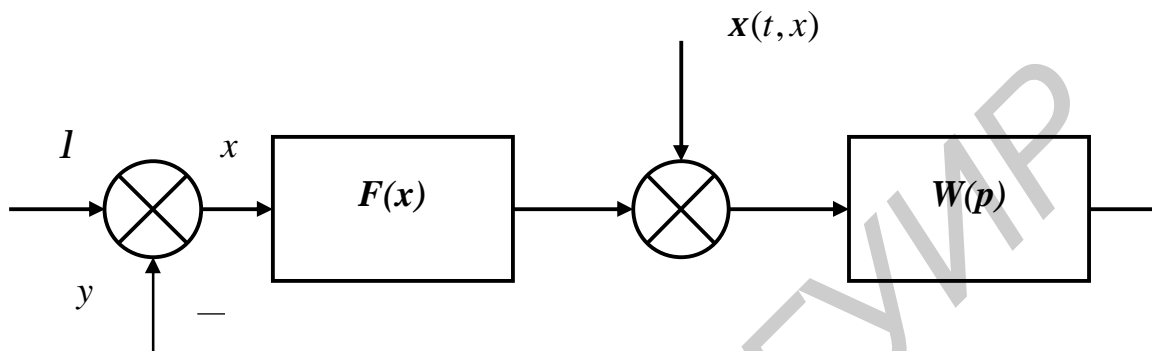


Рис. 4. Обобщенная структурная схема

Математический эквивалент дискриминатора включает элемент сравнения, нелинейное безынерционное звено $F(x)$ и сумматор.

Звено $W(p)$ определяется передаточными функциями опорного генератора и фильтра.

Характеристики составляющей шума $\xi(t, x)$ зависят от параметров дискриминатора и предшествующих цепей, отношения сигнал/шум, метода нормировки сигнала и шума по амплитуде, характера амплитудных флюктуаций сигнала.

Изменение ошибки во времени описывается нелинейным стохастическим дифференциальным уравнением

$$x(t) + W(p)F(x) + \xi(t, x) - \lambda(t) = 0.$$

Нелинейность уравнения определяется нелинейностью функции $F(x)$ и нелинейной зависимостью характеристик процесса $\xi(t, x)$ от ошибки слежения x . Стохастичность – наличием случайного процесса $\xi(t, x)$ и случайной составляющей задающего воздействия $\lambda(t)$.

Если напряжение флюктуационной составляющей имеет равномерную спектральную плотность в полосе, значительно превышающей полосу пропускания следующих за дискриминатором цепей, шум $\xi(t, x)$ можно считать белым и характеризовать его величиной спектральной плотности на нулевой частоте $S_x(\omega, x) = S_x(0, x)$, в общем случае зависящей от ошибки слежения. Зависимость спектральной плотности флюктуационной составляющей от ошибки слежения называется **флюктуационной характеристикой** дискриминатора.

Эквивалент дискриминатора можно существенно упростить при условии малости ошибки слежения x . При малой ошибке слежения дискриминационная характеристика линейна, а спектральную плотность флюктуационной составляющей можно принять с достаточным приближением не зависящей от ошибки слежения, т.е. $S_x(0, x) = S_x(x)$, $x(t, x) = x(t)$. В этом случае следящая система описывается линейным дифференциальным уравнением с постоянными коэффициентами, что упрощает ее анализ.

Определим передаточные функции, связывающие входные и выходные переменные в замкнутой следящей системе, представленной математической моделью (см. рис. 4).

Исходные соотношения:

$$x(t) = I(t) - y(t), \quad (1)$$

где $x(t)$ – ошибка слежения.

В свою очередь

$$y(t) = [x(t) \cdot S_o + x(t)] \cdot W(p). \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и сгруппируем слагаемые. В результате получим

$$x(t) = \frac{1 \cdot I(t)}{1 + S_o \cdot W(p)} - \frac{W(p) \cdot x(t)}{1 + S_o \cdot W(p)};$$

$$x(t) = H_{Ix}(p) \cdot I(t) + H_{xx}(p) \cdot x(t),$$

где $H_{Ix} = \frac{1}{1 + S_o \cdot W(p)}$ и $H_{xx} = -\frac{W(p)}{1 + S_o \cdot W(p)}$ – соответственно передаточные функции от воздействия к ошибке и от возмущения к ошибке. Найдены, таким образом, передаточные функции, связывающие ошибку слежения с входным воздействием и с флюктуационной составляющей.

Теперь подставим (1) в (2) и сгруппируем:

$$y(t) = \frac{S_o \cdot W(p)}{1 + S_o \cdot W(p)} \cdot I(t) + \frac{W(p)}{1 + S_o \cdot W(p)} \cdot x(t);$$

$$x(t) = H_{Iy}(p) \cdot I(t) + H_{xy}(p) \cdot x(t);$$

$$H_{Iy} = \frac{S_o \cdot W(p)}{1 + S_o \cdot W(p)}; \quad H_{xy} = -\frac{W(p)}{1 + S_o \cdot W(p)}.$$

$H_{Iy}(p)$ и $H_{xy}(p)$ – передаточные функции соответственно от воздействия к управляемой величине и от возмущения к управляемой величине.

Можно значительно упростить процесс определения передаточной функции, если использовать следующую формулу:

$$H_{UV}(p) = \frac{W_{np}(p)}{1 + W_p(p)},$$

где U – входное воздействие, а V – выходная величина;

$W_{np}(p)$ – передаточная функция прямой цепи, связывающей входное воздействие и выходную величину;

$W_p(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы (размыкается в точке подачи обратной связи и определяется как передаточная функция от ошибки $x(t)$ к управляемой величине $y(t)$).

В обобщенной структурной схеме можно определить следующие передаточные функции, определяющие связь входных и выходных величин.

Основная передаточная функция – передаточная функция замкнутой системы. Определяется отношением изображений по Лапласу управляемой величины и задающего воздействия:

$$H_{Iy}(s) = \frac{Y(s)}{\Lambda(s)},$$

где $Y(s) = L[y(s)]; \quad \Lambda(s) = L[I(s)]; \quad H_{Iy}(s) = \frac{S_\delta \cdot W(s)}{1 + S_\delta \cdot W(s)}$.

Передаточная функция разомкнутой системы – отношение изображений по Лапласу управляемой величины и ошибки слежения:

$$W_p(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}; \quad W_p(s) = S_\delta \cdot W(s); \quad H_{Iy}(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)}; \quad W_p(s) = \frac{H_{Iy}}{1 - H_{xy}}.$$

Передаточная функция от воздействия к ошибке – отношение изображений ошибки и задающего воздействия:

$$H_{Ix}(s) = \frac{1}{1 + W_p(s)}.$$

$H_{\xi y}$ – передаточная функция от возмущения к управляемой величине:

$$H_{xy}(s) = \frac{W(s)}{1 + W_p(s)}.$$

2.2. Установившийся режим работы ЛСС и характеристики точности

На практике любая следящая система работает с ошибками. Важно, чтобы эти ошибки не превосходили наперед заданных величин, допустимых с точки зрения задач, решаемых системой. Различают ошибки переходного и установившегося режимов. Теоретически последние определяются при $t \rightarrow \infty$ с момента поступления входного воздействия. На практике режим в системе считается установившимся с момента времени, когда выходной процесс после подачи или резкого изменения входного воздействия впервые попадает в область допустимых величин ошибки x и в дальнейшем из нее не выходит.

Функцию, описывающую входное воздействие $\lambda(t)$, для непрерывных систем в любой момент времени t_0 можно представить в виде ряда Тейлора в окрестности точки t_0 . Поскольку в ЛСС выполняется принцип суперпозиции, то реакция системы на воздействие, наблюдаемое в момент t_0 , является суммой реакций на постоянную составляющую этого воздействия и его производные. Поэтому при анализе ЛСС в качестве типового воздействия широко используют сигналы, у которых изменения параметра $\lambda(t)$ описываются полиномиальной функцией [1]:

$$I(t) = \left(I_0 + I_0^{(1)}t + \frac{1}{2}I_0^{(2)}t^2 + \dots + \frac{1}{k}I_0^{(k)}t^k \right) \cdot 1(t), \quad (3)$$

где $I_0 = I(t_0)$; $I_0^{(1)} = \frac{dI(t)}{dt}$; ..., $I_0^{(k)} = \frac{d^k I(t)}{dt^k} \Big|_{t=t_0}$ – значения задающего воздействия и его производных в момент времени, принимаемый за начало отсчета; $t_0 = 0$; $1(t)$ – единичная функция включения, отражающая тот факт, что с момента t_0 и до $t \rightarrow \infty$ характер рассматриваемого воздействия на входе остается таким же, как и в момент t_0 . Эпюры типовых воздействий приведены на рис. 5, а, б, в.

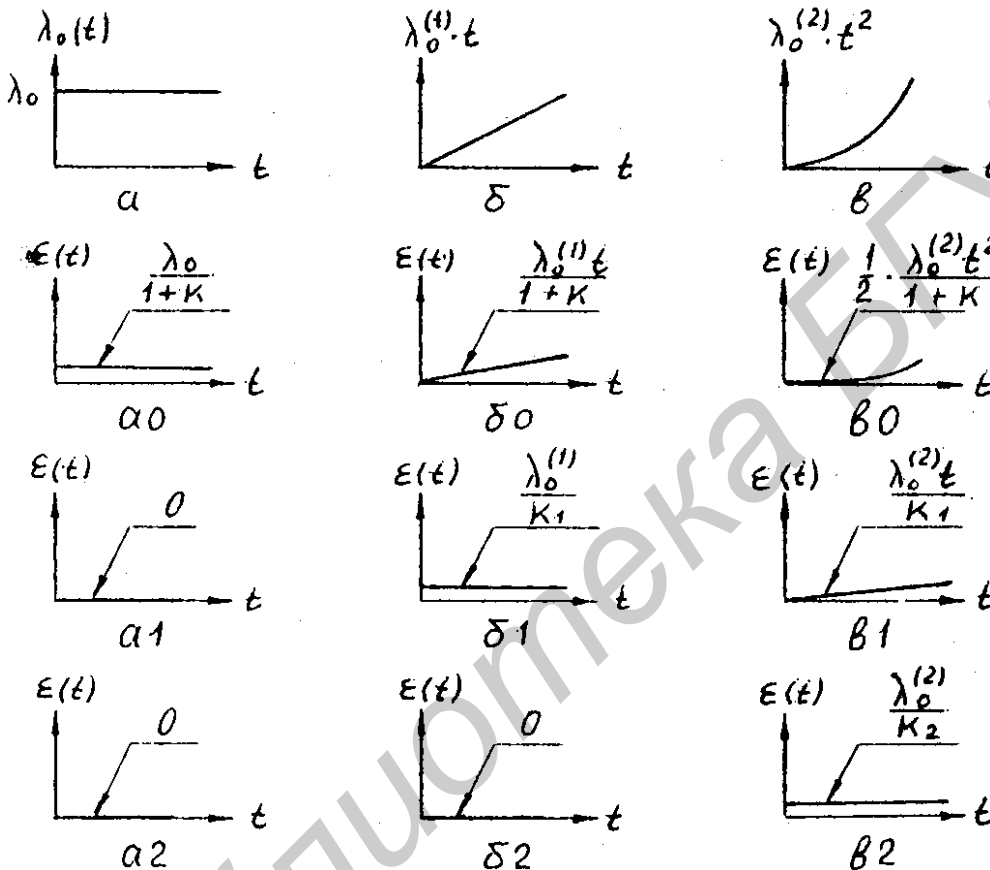


Рис. 5. Эпюры входных воздействий и сигналов ошибки

Проанализируем ошибки в ЛСС (см. рис. 5, а0, б0, в0) при условии, что система (см. рис. 1) безынерционна. Рассмотрим статическое входное воздействие (см. рис. 5, а):

$$\lambda(t) = \lambda_0 \cdot 1(t).$$

Величина ошибки в операторной форме с учетом того, что $W_{\text{ЭС}}(p) = 1$, описывается выражением

$$x(t) = I_0 1(t) W_{I_e}(p) = I_0 1(t) \frac{1}{1+W_{\text{ВЭ}}(p)}.$$

Ошибка в установившемся режиме $x(t)/t \text{ @ } \text{¥}$ определяется достаточно просто, если рассмотрение перенести в область изображений по Лапласу и воспользоваться теоремой о конечном значении оригинала:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [x(t)] = \lim_{S \rightarrow 0} sX(s),$$

где $X(s) = L[x(t)]$ – изображение ошибки;

$L[\cdot]$ – преобразование Лапласа.

Изображение входного воздействия $L[\lambda_0 I(t)] = \lambda_0/s$. Изображение $L[W_{\lambda x}(p)] = W_{\lambda x}(s) = 1/(1 + W_{y3}(s))$ формально получается заменой дифференциального оператора $p = d/dt$ на переменную $s = c + Jw$. Выражение для установившейся ошибки в этом случае примет вид

$$x_{уст}(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \lim_{S \rightarrow 0} s \frac{I_0}{s} \frac{1}{1 + W_{y3}(s)} = I_0 \bullet \lim_{S \rightarrow 0} W_{Ix}(s).$$

Для определения значения изображения передаточной функции ошибки $W_{Ix}(s)$ в пределе при $s \rightarrow 0$ разложим ее в ряд Тейлора в окрестности точки $s=0$ согласно выражению [1]:

$$W_{Ix}(s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} \left(\frac{d^k W_{Ix}(s)}{ds^k} \right)_{s=0} \cdot s^k = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k!} C_k \cdot s^k. \quad (4)$$

Величины C_k получили название коэффициентов ошибки по k -м производным входного воздействия.

Поскольку анализируемая система безынерционна, то передаточная функция разомкнутой системы равна

$$W_p(s) = W_{эс}(s) W_{y3}(s) = K,$$

где K – постоянная величина, равная коэффициенту усиления контура следящей системы (см. рис. 2).

Следовательно, $W_{Ix}(s) = 1/(1+K)$ и все члены ряда (3), кроме нулевого $C_0 = 1/(1+K)$, будут равны нулю.

Для данной системы передаточная функция от воздействия к ошибке при $s=0$ представлена лишь одним коэффициентом $W_{Ix}(0) = C_0$, поэтому величина установившейся ошибки при $\lambda(t) \text{ @ } \text{¥}$ запишется в виде

$$x_{уст}(t) = \lambda \cdot C_0.$$

Из этого выражения следует, что ошибка постоянна во времени и пропорциональна величине статического воздействия или постоянной составляющей входного воздействия (см. рис. 5, а0). Она называется ошибкой по положению (статизмом), а системы, обладающие такой ошибкой, – статическими.

Если на вход статической системы поступает полиномиальное воздействие (3), то, кроме статической, будут присутствовать динамические ошибки установившегося режима, величины которых изменяются с течением времени. Суммарная ошибка установившегося режима анализируемой статической системы запишется в виде

$$x(t) = \left(g_0 + I_0^{(1)}t + \frac{1}{2} I_0^{(2)}t^2 + \dots + \frac{1}{k!} I_0^{(k)}t^k \right) \cdot \frac{1}{1+K}.$$

Эпюры первых трех составляющих сигнала ошибки соответственно a_0 , b_0 , v_0 приведены на рис. 5.

В статической системе статическая ошибка (см. рис.5, a_0) практически не устранима и может быть существенно снижена лишь за счет уменьшения $W_{\lambda x}(p)$ (в данном случае за счет увеличения K).

Физически это можно пояснить так: поскольку система в соответствии с принципом управления по отклонению стремится свести ошибку к нулю, то в некоторый момент времени возможно допустить выполнение равенства $\lambda(t) = y(t)$. При этом ошибка $x(t) = 0$, $U_{out}(t) = 0$ и система как бы замыкается на выходе дискриминатора. Следовательно, в силу безынерционности системы, на выходе УЭ и входе дискриминатора сигнал тоже должен быть равен нулю $y(t) = 0$, что противоречит исходному утверждению. Равенство $\lambda(t) = y(t)$ в такой системе принципиально недостижимо.

На практике при $K \gg 1$ в установившемся режиме работы ошибка $x(t) = \lambda(t) - y(t)$ уменьшается во столько раз, во сколько возрастает коэффициент, необходимый для усиления этой разности до величины $y(t)$. Следовательно, требование $x(t) \approx 0$ выполняется при условии $K \approx \infty$. Кроме того, величина статической ошибки при неизменном K зависит от уровня входного воздействия, что не позволяет ее компенсировать. Эти недостатки можно устранить, если с момента, когда $x(t)$ становится равной нулю, выходную величину поддерживать равной $y(t)$, несмотря на то, что $U_{out}(t) = 0$. Для этого $y(t)$ нужно запомнить.

Роль «памяти» в системе выполняет интегрирующий элемент: собственно интегратор напряжения или тока; генератор сигнала с управляемой частотой, у которого фаза сигнала, как известно, имеет интегральную зависимость от частоты; электродвигатель, который меняет угол поворота вала в соответствии с интегралом от функции приложенного напряжения и др. На выходе интегратора при «размыкании» системы, когда ошибка $x(t) = 0$, сохраняется уровень сигнала или параметра, предшествовавший этому моменту. Следовательно, системы с интегратором в контуре управления работают без ошибки при статическом воздействии на входе. Поэтому они получили название астатических.

Если интегратор неидеальный, то после «размыкания» системы величина $y(t)$ с течением времени изменяется, что, в свою очередь, приводит к появлению ошибки, которая обрабатывается системой. Система стремится восстановить равенство $\lambda(t) - y(t) = 0$. При этом можно указать величину $y_{уст}$, и считается, что если $Dy(t) = y(t) - y_{уст} < | \pm D_{дон} |$, то система работает с заданной точностью. Ошибки в таких системах не зависят от величины статического воздействия на входе, а сами системы также относятся к классу астатических.

Понятие астатизма тесно связано с характером ошибок в системе, возникающих при полиномиальном воздействии на входе. Астатические сис-

темы характеризуются порядком астатизма, который на практике определяется числом k интегрирующих звеньев, включенных в контур управления.

Системы с астатизмом k -го порядка реагируют на полиномиальное входное воздействие (3) так, что ошибка от слагаемых, определяемых $0, 1, \dots, k-1$ производными входного воздействия, равна нулю; от слагаемого с k -й производной – постоянна, а от слагаемых с производными выше k она возрастает с течением времени

На рис. 5 приведены эпюры ошибок для статической системы (a_0, b_0, v_0), системы с астатизмом 1-го порядка (a_1, b_1, v_1) и системы с астатизмом 2-го порядка (a_2, b_2, v_2) при статическом воздействии (эпюры a_0, a_1, a_2), при постоянной скорости изменения входного воздействия (эпюры b_0, b_1, b_2), при постоянном ускорении (эпюры v_0, v_1, v_2).

Возможность исключения ошибок объясняется принципом работы интегратора. Если на входе интегратора сигнал стал равным нулю, на его выходе сохраняется уровень сигнала, предшествовавшего этому моменту. Если сигнал на входе постоянный, на выходе он изменяется линейно. Линейно изменяющемуся сигналу на входе соответствует выходной сигнал, изменяющийся по квадратичному закону, и т.д.

Будучи последовательно включенными в контур управления следящей системы, каждый из интеграторов обладает «памятью» по соответствующей производной в полиномиальном разложении входного воздействия. Первый интегратор – по составляющей входного воздействия с нулевой производной, а следовательно, исключает статическую ошибку или ошибку по положению (см. рис. 5, a_1, a_2), второй интегратор – по составляющей с первой производной, исключает ошибку по скорости изменения входного воздействия (см. рис. 5, b_2), третий – по составляющей со второй производной, исключает ошибку по ускорению и т.д.

Это положение теоретически вытекает из рассмотрения разложения входного воздействия в ряд Тейлора, члены которого умножаются на соответствующие коэффициенты ошибки [1,2,3].

2.3. Переходный режим работы ЛСС и его характеристики

В промежутке времени между двумя установившимися режимами работы следящей системы (или при ее включении) возникает переходный процесс, вызванный изменением характера входного или возмущающего воздействия, например, изменением постоянной составляющей и (или) производных воздействия. Время, за которое с момента изменения воздействия осуществляется переход системы в установившийся режим, характеризует ее быстродействие.

Если система имеет недостаточное быстродействие по отношению к скорости изменения входного или возмущающего воздействия, то длительность переходного процесса может оказаться недопустимо большой с точки зрения эксплуатации системы или в системе может произойти срыв слежения из-за возрастания ошибки до величин, превышающих раскрыв дискриминационной характеристики [1, 2, 3, 4].

Для оценки и сопоставления характеристик переходного процесса с целью сравнения различных следящих систем используют типовое входное воздействие – единичный скачок параметра на входе $\lambda(t) = \lambda_0 1(t-t_0)$ в момент t_0 . При этом характер протекания переходных процессов, наблюдаемый по изменению выходной величины, может иметь различный вид и зависит от параметров системы. Наиболее часто встречаются аperiodический (рис. 6, а) и колебательный (рис. 6, б, в) виды.

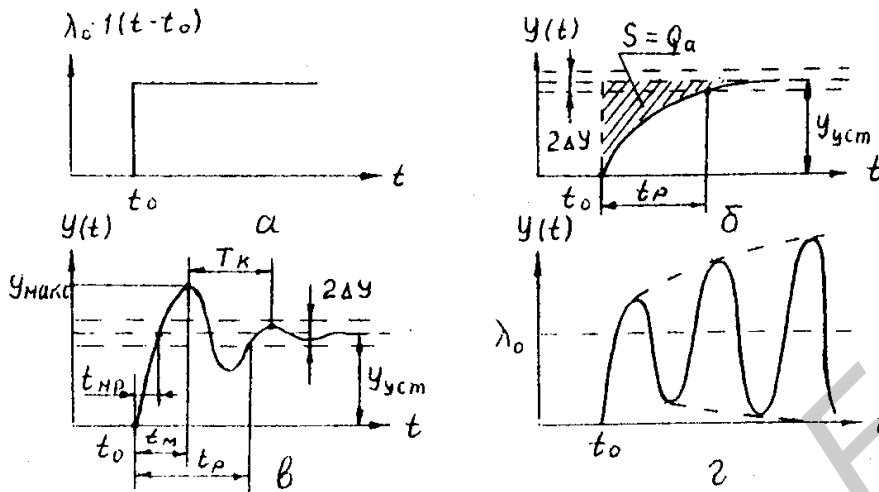


Рис. 6. Переходные характеристики линейной следящей системы

Показатели качества переходного процесса, определяемые непосредственно по кривой переходного процесса $y(t)$ в одной точке (локально), являются прямыми локальными оценками. К ним относятся (рис. 6, б, в):

- длительность переходного процесса, определяемая временем регулирования t_p , которое прошло с момента t_0 возникновения единичного воздействия до момента времени, после которого будет выполняться неравенство $|y(t) - y_{уст}| < \Delta y$, где $y_{уст}$ – значение выходной величины в установившемся режиме, Δy – допустимая величина ошибки слежения или заранее оговоренная величина, например $\Delta y = 0,05 y_{уст}$;

- перерегулирование – относительная величина максимального отклонения $y(t)$ от значения $y_{уст}$, выраженная в процентах:

$$H_{МАКС} = \frac{y_{МАКС} - y_{УСТ}}{y_{УСТ}} 100\%;$$

- время достижения первого максимума t_m ;

- время нарастания переходного процесса $t_{нр}$ – абсцисса точки первого пересечения кривой $y(t)$ с уровнем $y_{уст}$;

- частота колебаний $f_k = 1/T_k$ (см. рис. 6, в);

- число колебаний n за время t_p .

Локальные прямые показатели переходного процесса достаточно легко измерить, но в ряде случаев сложно вычислить аналитически. Более удобными в этом плане являются интегральные оценки (косвенные показатели), которые представляют собой интегралы от функций $(x_{ПЕР} = y(t) - y_{уст}; |x_{ПЕР}(t)|; x_{ПЕР}^2(t))$ на интервале от $0 \leq t < \infty$.

Например, интегральная абсолютная оценка

$$Q_a = \int_{t_0} |x_{ПЕР}(t)| dt = \int_{t_0} |y(t) - y_{уст}| dt$$

геометрически представляет площадь $S = Q_a$ фигуры, ограниченной траекториями идеального (без ошибок) и реального $y(t)$ переходных процессов (см. рис. 6, б). Наиболее удобной для анализа переходных процессов аналитически как при детерминированных, так и случайных воздействиях, является интегральная квадратичная оценка:

$$Q_{KB} = \int_{t_0} |x^2_{ПЕР}(t)| dt.$$

2.4. Устойчивость ЛСС

Линейная следящая система устойчива, если она, будучи выведенной из установившегося режима входным или возмущающими воздействиями (помехами), вновь возвращается в исходный режим после прекращения этих воздействий. Физические причины потери устойчивости системой связаны с инерционностью ее звеньев. Теоретически безынерционная система абсолютно устойчива. На практике функциональные элементы любой ЛСС в большей или меньшей степени обладают инерционностью. В случае присутствия гармонического воздействия на входе таких элементов реакция на их выходе запаздывает относительно входа на величину Dt_3 . Это приводит к возникновению различия во взаимном положении на оси времени реакции $y(t)$ относительно воздействия $\lambda(t)$ на величину Dj :

$$\Delta j = \frac{\Delta t_3}{T} 2p = \Delta t_3 \cdot w,$$

где T – период колебания выходной величины $y(t)$.

Как следует из этого выражения, при $Dt_3 = const$ с ростом частоты w входного воздействия величина Dj возрастает линейно. Зависимость $Dj(w)$ представляет собой фазочастотную характеристику (ФЧХ) элемента или последовательности элементов (см. рис. 6).

В замкнутой ЛСС схемотехнически реализуется отрицательная обратная связь (ООС), а следовательно, при гармоническом воздействии $\lambda(t)$ на входе из воздействия должна вычитаться выходная реакция – гармонически изменяющаяся выходная величина (выходной параметр) $y(t)$. Эта операция для гармонического входного воздействия и реакции системы эквивалентна их суммированию со сдвигом фазы выходного воздействия относительно входного на $Dj_{OC} = -p$. Однако из-за задержки в функциональных элементах системы на пути преобразования ошибки $x(t)$ в величину $y(t)$ по петле обратной связи выходная величина приобретает дополнительный фазовый сдвиг, равный фазовому сдвигу в разомкнутой системе $Dj_P(w)$.

В зависимости от инерционных свойств функциональных элементов в петле разомкнутой обратной связи на определенной частоте, называемой критической частотой w_{KP} , дополнительный фазовый сдвиг может принять значение $Dj_P(w_{KP}) = -p$. При этом полный фазовый сдвиг между входным

воздействием и выходной величиной в замкнутой системе становится равным $Dj = Dj_{OC} + Dj_P(w_{KP}) = -2p$. Это значит, что для сигнала с частотой w_{KP} ОС из отрицательной перешла в положительную. В этом случае входное воздействие суммируется с выходной величиной в фазе, т.е. в системе наблюдается баланс (одинаковость, равенство с обеих сторон) их фаз, что может привести к теоретически неограниченному росту выходной величины (самовозбуждению).

Когда на ФЧХ разомкнутой системы имеется точка с координатами w_{KP} ; $Dj(w_{KP}) = -p$, например А (рис. 7), то говорят, что система склонна к самовозбуждению. В таком случае и только при условии, что в спектре входного или возмущающих воздействий присутствует гармоническая составляющая с частотой w_{KP} , в системе возможно возникновение одного из трех видов колебаний выходной величины $y(t)$ на частоте w_{KP} : затухающих, нарастающих или с постоянной амплитудой.

Возможность протекания в ЛСС различных колебательных процессов объясняется тем, что кроме ФЧХ функциональных элементов и всей системы существует частотная зависимость модулей их коэффициентов передачи, получившая название амплитудно-частотной характеристики (АЧХ). У отдельных звеньев и системы в целом АЧХ с ростом частоты падает. На определенной частоте, называемой частотой среза w_{CP} , модуль коэффициента передачи $A(w)$ разомкнутой системы принимает значение $A(w) = 1$. С энергетической точки зрения это значит, что энергия, потерянная гармоникой сигнала на частоте w_{CP} в пассивных элементах разомкнутой системы, полностью компенсируется ее активными элементами, благодаря чему поддерживается равенство величин уменьшения амплитуды сигнала из-за тепловых потерь и увеличения ее за счет энергии источника питания. Такое состояние в системе получило название «баланс амплитуд».

Теоретически возможно построение ЛСС, для которой на некоторой частоте w выполняется условие равенства $w = w_{KP} = w_{CP}$. На этой частоте наблюдается и баланс амплитуд. Следовательно, при наличии в спектре воздействия гармоники на частоте w_{KP} в системе устанавливаются собственные колебания, которые сохраняются и после окончания воздействия. Причем их амплитуда остается постоянной, равной амплитуде гармоники воздействия. Такое состояние является пограничным между процессом затухания и процессом нарастания собственных колебаний в системе (границей устойчивости).

Если $w_{KP} > w_{CP}$, то в системе после прекращения действия гармоники с частотой $w = w_{KP}$ колебания затухают, т.к. $|W_P(w_{KP})| < 1$, и энергия, внесенная в систему воздействием, постепенно рассеивается (см. рис. 6, в). При $w_{KP} < w_{CP}$ наблюдается рост амплитуды колебаний до величины, ограниченной насыщением активных элементов, т.к. до насыщения $|W_P(w_{KP})| > 1$, и амплитуда стремится к возрастанию (см. рис. 6, г).

Теоретически заключение об устойчивости замкнутой ЛСС можно сделать, проанализировав с позиций частотного критерия устойчивости

Найквиста амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ) данной системы в разомкнутом состоянии. Для этого необходимо получить экспериментально или построить аналитически АФЧХ разомкнутой ЛСС.

Аналитически АФЧХ получается из операторного коэффициента передачи $W_p(p)$ постановкой $p = j\omega$:

$$W_p(j\omega) = \frac{M(j\omega)}{N(j\omega)}.$$

Выражение для АФЧХ является комплексной величиной и может быть представлено в виде

$$W_p(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega) e^{j\psi(\omega)},$$

где $A(\omega) = |W_p(j\omega)| = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}$, $\psi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$.

На комплексной плоскости функция $W_p(j\omega)$ в диапазоне частот $0 \leq \omega < \infty$ изображается кривой, называемой годографом (см. рис. 7), которая прочерчивается концом вектора, например OB , проведенном из начала координат в точку, соответствующую значению текущей частоты ω . Длина вектора $|W_p(j\omega)| = A(\omega)$ уменьшается с ростом ω и представляет собой в декартовых координатах $\{A; \omega\}$ амплитудно-частотную характеристику разомкнутой ЛСС. Экспериментально $A(\omega)$ определяется как отношение амплитуды гармонически изменяющегося параметра $y(t)$ на выходе к амплитуде гармонического воздействия $\lambda(t)$ на входе разомкнутой ЛСС в диапазоне частот $0 \leq \omega < \infty$.

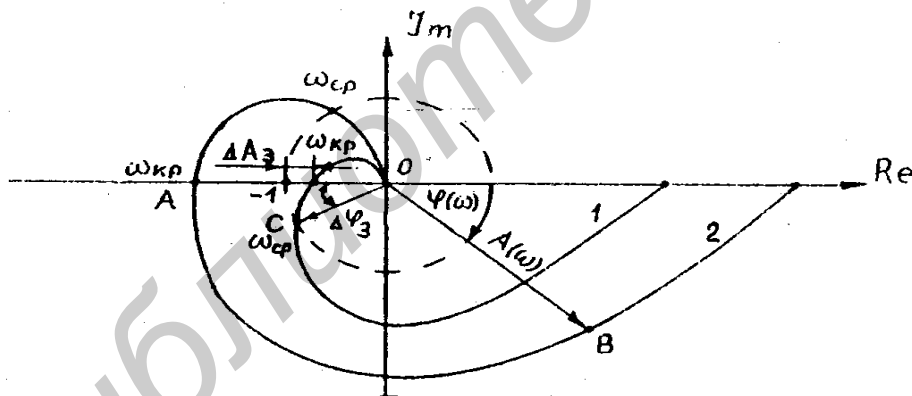


Рис. 7. Годографы разомкнутых ЛСС:

1 – годограф устойчивой системы; 2 – годограф неустойчивой системы

Угол поворота вектора $j(\omega)$ возрастает с ростом ω и учитывает отставание фазы $y(t)$ от фазы $\lambda(t)$. Поэтому он откладывается на комплексной плоскости по часовой стрелке от положительной полуоси вещественных чисел. В декартовых координатах $\{j; \omega\}$ зависимость $j(\omega)$ представляет собой фазочастотную характеристику (ФЧХ) разомкнутой ЛСС (рис.8). Она может быть получена экспериментально, например, с помощью осциллографа путем измерения задержки $y(t)$ относительно $\lambda(t)$ в диапазоне частот $0 \leq \omega < \infty$.

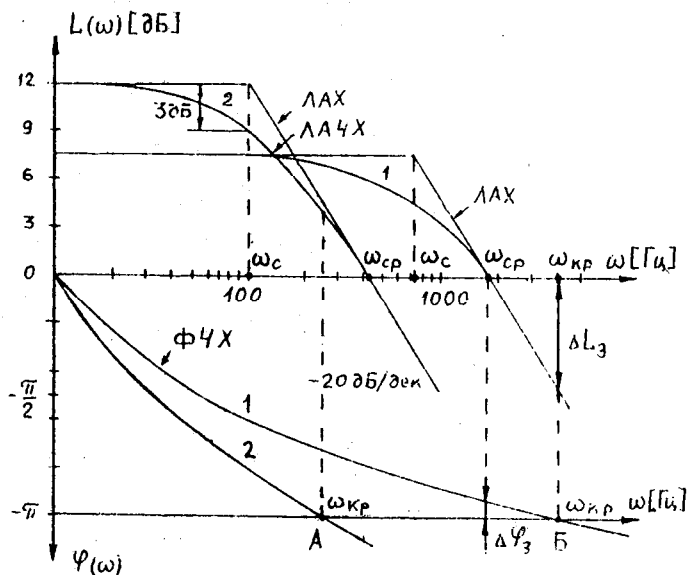


Рис. 8. ЛЧХ разомкнутых ЛСС:

1 – ЛЧХ устойчивой системы; 2 – ЛЧХ неустойчивой системы

При исследовании систем частотными методами удобно пользоваться логарифмическими частотными характеристиками, для построения которых используется логарифмическая шкала частот. Амплитудно-частотная характеристика $A(\omega)$ связана с логарифмической амплитудно-частотной характеристикой (ЛАЧХ) $L(\omega)$ соотношением

$$L(\omega) = 20 \lg A(\omega) [\text{дБ}].$$

При построении ЛАЧХ значения $L(\omega)$ в децибелах (дБ) откладываются по оси ординат в линейном масштабе, а угловая частота ω – по оси абсцисс в логарифмическом. Построение ФЧХ производится на той же оси частот, но по оси ординат откладываются значения фазы в градусах или радианах в линейном масштабе (см. рис. 8).

Преимущества ЛАЧХ проявляются при построении так называемых асимптотических логарифмических амплитудных характеристик (ЛАХ), аппроксимирующих (ЛАЧХ) прямолинейными отрезками. Достоинство ЛАХ в том, что сумма ЛАХ типовых звеньев системы дает ЛАХ всей разомкнутой системы. Для типового звена ЛАХ представляет собой две асимптоты ЛАЧХ слева и справа от сопрягающей частоты ω_c , которая определяется постоянной времени звена $\omega_c = 1/T$. Максимальная ошибка аппроксимации не превышает 3 дБ.

На рис. 7 изображены годографы разомкнутых ЛСС. Кривая 1 является годографом устойчивой системы, кривая 2 – годографом неустойчивой системы. В справедливости такого утверждения можно убедиться, применив частотный критерий Найквиста [1], согласно которому замкнутая следящая система устойчива, если годограф комплексного коэффициента передачи разомкнутой системы не охватывает на комплексной плоскости точку с координатами $\{-1, j0\}$.

Действительно, кривая 1 пересекает ось абсцисс, не достигая точки $\{-1, j0\}$. Заметим, что любой точке пересечения оси абсцисс левее нуля соот-

ветствует вектор, проведенный в нее из начала координат, и угол поворота этого вектора относительно положительного направления действительной оси равен $-\pi$. Следовательно, вектор изображает комплексный коэффициент передачи разомкнутой системы на критической частоте $W_P(jw_{KP})$. На частоте $w = 0$ вектор $W_P(j0)$ будет ориентирован в положительном направлении оси абсцисс, а длина его пропорциональна коэффициенту передачи статического входного воздействия.

Для системы, представленной годографом 1, на w_{KP} модуль вектора $|W_P(w_{KP})| < 1$, откуда следует, что в системе не выполняется условие баланса амплитуд на частоте, соответствующей балансу фаз. Значит, система устойчива, чего нельзя сказать о системе, имеющей годограф 2 (см. рис. 7), т.к. $|W_P(jw_{KP})| > 1$.

Чтобы привести систему 1 к границе устойчивости, где выполняется условие баланса амплитуд, необходимо увеличить модуль коэффициента передачи на величину DA (см. рис. 7) или в k_3 раз. При этом коэффициент передачи $k_3 W_P(w_{KP}) = 1$, откуда следует, что

$$k_3 = \frac{1}{|W_P(jw_{KP})|}.$$

Величина k_3 называется запасом устойчивости по амплитуде.

Частоте среза w_{CP} на годографе 1 (см. рис. 7) будет соответствовать точка С, полученная в результате пересечения годографа окружностью единичного радиуса, так как в этой точке длина вектора ОС есть $|W_P(w_{CP})| = 1$. Если в системе 1 увеличить инерционность настолько, чтобы уже на частоте воздействия $w = w_{CP}$ выполнилось равенство $j(w_{CP}) = -p$, то будет наблюдаться баланс фаз и амплитуд. Это эквивалентно повороту вектора ОС на угол Dj_3 (см. рис. 7) и приведет систему к границе устойчивости. Величина $Dj_3 = p - /j(w_{CP})/$ называется запасом устойчивости по фазе.

Аналогичные результаты можно получить, применив критерий Найквиста к ЛЧХ (см. рис. 8) разомкнутых систем 1 и 2, поскольку годограф и ЛЧХ являются лишь различными формами представления комплексного коэффициента передачи $W_P(jw)$.

Экспериментально оценить устойчивость ЛОС можно не только по годографу или ЛЧХ, но и по характеристике переходного процесса, наблюдаемой на выходе замкнутой системы. При скачкообразном изменении входного воздействия в его спектре содержится теоретически бесконечное число гармоник. Если система склонна к самовозбуждению, то для гармоник с частотой $w = w_{KP}$ будет выполняться баланс фаз, что приведет к перерегулированию. Величина перерегулирования тем больше, чем выше коэффициент передачи этой гармоники, т.е. чем ближе расположена система к границе устойчивости. Запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi_3$ определяется с помощью приближенного соотношения

$$Dj_3 = 73 - H_{МАКС} (\%),$$

где $H_{МАКС} (\%)$ – величина перерегулирования.

На практике требуемый запас устойчивости по фазе $Dj_3 = 30^\circ - 60^\circ$, а запас устойчивости по амплитуде $DL_3 = 20 \lg k_3 > 10 - 15$ дБ.

3. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДУЕМЫХ МОДЕЛЕЙ

В качестве исследуемых моделей в лабораторной работе используются модели системы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) и частотной автоподстройки (ЧАП).

Структурная схема системы ФАПЧ приведена на рис. 9.

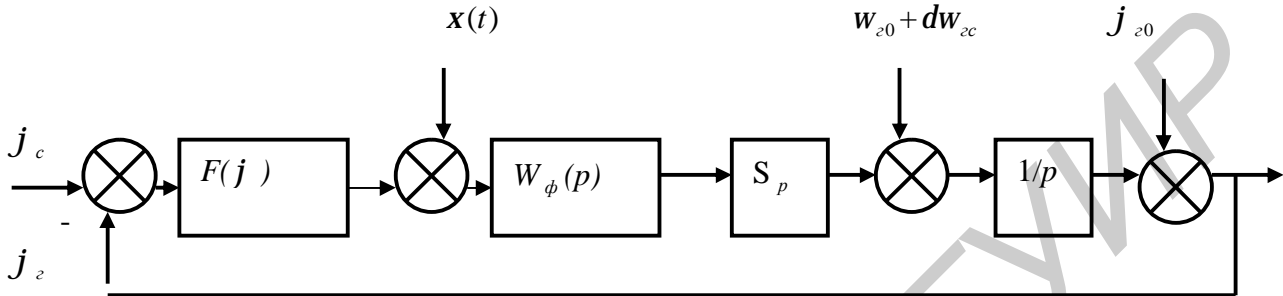


Рис. 9. Структурная схема системы ФАПЧ

Коэффициент передачи (усиления) системы ФАПЧ:

$$K = S_{\phi\delta} * K_{\phi} * S_p,$$

где $F(\varphi) = S_{\phi\delta} * \varphi$; $S_{\phi\delta}$ – крутизна дискриминационной характеристики фазового дискриминатора;

K_{ϕ} – коэффициент передачи (усиления) фильтра ;

S_p – крутизна регулировочной характеристики подстраиваемого генератора.

Передаточная функция разомкнутой системы ФАПЧ определяется выражением

$$Wp(p) = W_{\phi}(p) * K * \frac{1}{(1 + p * T_{\phi\delta})} * \frac{1}{p},$$

где $W_{\phi}(p)$ – передаточная функция фильтра;

$T_{\phi\delta}$ – постоянная времени фазового дискриминатора.

Структурная схема системы ЧАП приведена на рис.10.

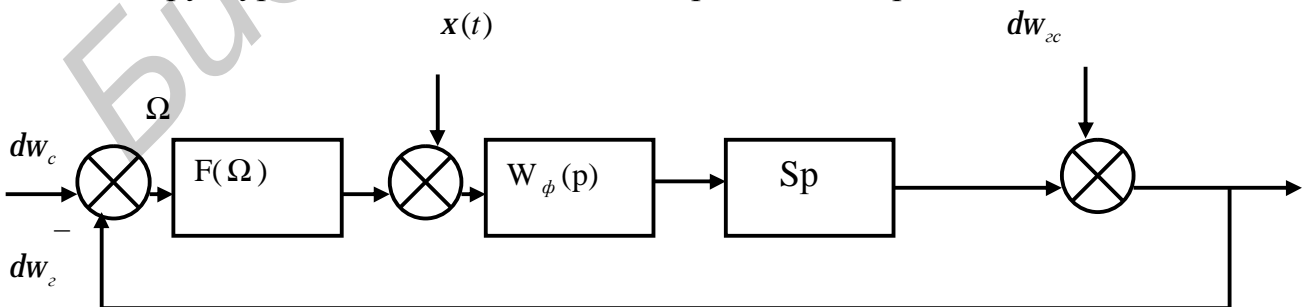


Рис. 10. Структурная схема системы ЧАП

Коэффициент передачи (усиления) системы АПЧ:

$$K = S_{\omega\delta} * K_{\phi} * S_p,$$

где $S_{\text{чд}}$ – крутизна дискриминационной характеристики;

K_{ϕ} – коэффициент передачи фильтра;

S_p – крутизна регулировочной характеристики подстраиваемого генератора.

Передаточная функция разомкнутой системы АПЧ:

$$Wp(p) = W_{\phi}(p) * K .$$

4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ЗВЕНЬЯ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ В КАЧЕСТВЕ ФИЛЬТРОВ

4.1. Звенья, представленные в программе передаточными функциями и электрическими схемами

Безынерционное звено (звено 1) представлено в виде схемы (рис. 11) и определяется передаточной функцией

$$W_{\phi}(p) = \frac{R2}{R1 + R2} .$$

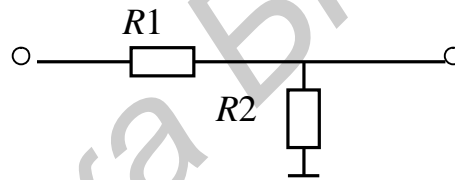


Рис. 11

Апериодическое звено 1-го порядка (звено 2, рис. 12) определяется передаточной функцией

$$W_{\phi}(p) = \frac{1}{R1 * jwC + 1} .$$

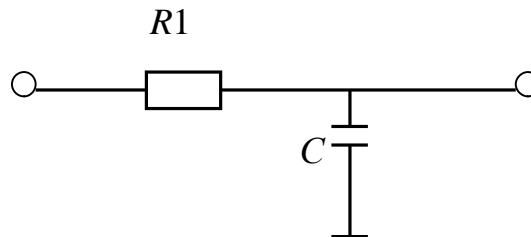


Рис. 12

Пропорционально-интегрирующее звено (звено 4, рис. 13) определяется передаточной функцией

$$W_{\phi}(p) = \frac{1 + T2 * p}{1 + T1 * p} ,$$

где $T2 = R2 * C$; $T1 = \left(1 + \frac{R1}{R2}\right) * T2$.

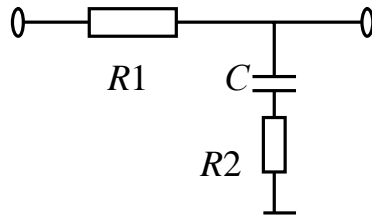


Рис. 13

Апериодическое звено первого порядка (звено 5, рис. 14) определяется передаточной функцией

$$W\phi(p) = \frac{K}{1 + T2 * p},$$

где $K = R2(R1 + R2)$; $T2 = \frac{R1 * R2 * C}{R1 + R2}$.

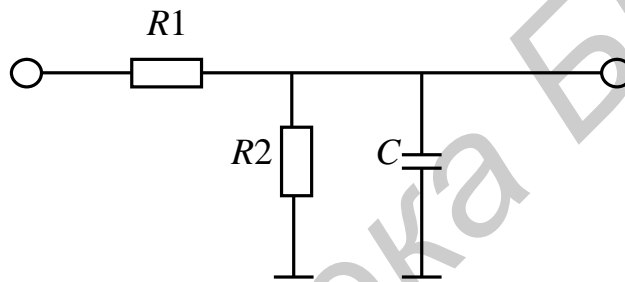


Рис. 14

Колебательное звено (звено 6, рис. 15) определяется передаточной функцией

$$W\phi(p) = \frac{1}{p^2 T1 + p T2 + 1},$$

где $T1 = LC$; $T2 = R1 * C$.

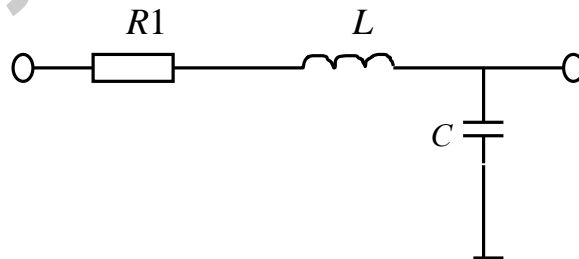


Рис. 15

4.2. Звенья, представленные в программе передаточными функциями

Изодромное звено (звено 7):

$$W\phi(p) = \frac{K(1 + pT)}{p}.$$

Дифференцирующее звено (звено 9):

$$W_{\phi}(p) = Kp.$$

Инерционно-дифференцирующее звено (звено 10):

$$W_{\phi}(p) = \frac{Kp}{1 + pT},$$

где $K=R1$; $T=R2$.

5. УСТАНОВКА, ЗАПУСК И ПОРЯДОК РАБОТЫ С ПРОГРАММОЙ

Для работы с программой используется система MATLAB.

Для запуска программы:

- загрузите систему MATLAB;
- в окне команд CURRENT DIRECTORY выберите соответствующий адрес расположения командных файлов: D:\RA\ЛСС;
- если адрес отсутствует, нажмите кнопку обзора «Browse for folder» и выберите директорию, в которую были помещены файлы программы;
- для запуска программы наберите в командном окне «MATLAB Command Window» название программы – «Linesyst1» – и нажмите клавишу Enter, после чего появится окно интерфейса программы.

Для исследования систем:

- выберите типовое звено фильтра исследуемой системы, после чего типовое звено фильтра должно отобразиться графически;
- выберите исследуемую систему, после чего исследуемая система должна отобразиться графически;
- задайте параметры фильтра и системы.

При исследовании переходных характеристик наведите курсор на график переходного процесса и нажмите правую кнопку мыши, после чего высветится меню:

- система (Systems);
- характеристика (characteristics);
- сетка;
- нормаль (normalise);
- полный просмотр (full view);
- свойства (property).

В строке система отображается выбранная система (wr) или (wz).

Строка «Характеристика»:

- peak response – отображает на графике точку, в которой амплитуда максимальна $Y_{\max}(t)$;
- settling time – отображает на графике точку в которой происходит установление – быстродействие системы ($t_{уст}$);
- rise time – время достижения максимума;

- steady state – отображает точку установившегося значения амплитуды $Y(\infty)$;

- сетка – отображает сетку на графике;

- normalise – нормализует значение (подгоняет под единицу);

- full view – полный просмотр.

Property (свойства):

- labels – метки к графику (заголовок, X – ярлык, Y – ярлык);

- limits – пределы отображения характеристики (автоматический, пределы от ... до ...);

- units – единицы измерения (недоступны);

- style – стиль (grid – сетка, fonts – шрифты, colors – цвета);

- characteristics – характеристики .

При исследовании годографа:

- show → negative frequencies (показать/отключить отрицательные частоты);

- characteristics – пиковый ответ;

- стабильность (пересечение минимума);

- стабильность (все пересечения).

При исследовании АЧХ, ФЧХ:

- show – показать АЧХ, показать ФЧХ.

При исследовании реакции системы на воздействие задающее воздействие формируется путем ввода коэффициентов полиномиальной функции:

$$y(t) = at^2 + bt + c .$$

Задающее воздействие отображается на графике синим цветом, реакция системы – зелёным.

Только при исследовании реакции системы на входное воздействие вычисляются коэффициенты ошибок по положению, скорости и ускорению, а также астатизм системы.

Карта нулей и полюсов отображает значение нулей и полюсов системы.

Щелкнув мышью на любую точку графика, можно получить информацию об этой точке (кроме реакции на воздействие).

6. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

6.1. Исследование зависимостей показателей качества системы от параметров звеньев

Переходная характеристика:

- выберите типовое звено фильтра;

- выберите исследуемую систему;

- исследуемая зависимость – переходная характеристика;

- установите параметры системы;

- нажмите кнопку «Рассчитать/построить»;

- зарисуйте переходную характеристику системы.

Для устойчивых состояний:

- на графике, нажав правую кнопку мыши, выберите:

/Characteristics/Peak Response, после чего на графике должна отобразиться точка максимума амплитуды « Y_{max} », затем запишите значение « Y_{max} », наведя мышью на точку и нажав левую кнопку; запишите время установления первого максимума;

- на графике, нажав правую кнопку мыши, выберите:

/Characteristics/Settling Time, после чего отобразится точка времени установления системы $t_{уст}$, характеризующего быстрдействие системы; запишите результат;

- на графике, нажав правую кнопку мыши, выберите:

/Characteristics/Steady State, после чего отобразится точка установившегося значения амплитуды $Y(\infty)$; запишите результат.

Рассчитайте перерегулирование:

$$d = \frac{Y_{max} - Y(\infty)}{Y(\infty)} * 100\% .$$

Изменяя параметры системы, исследуйте зависимость параметров переходного процесса от параметров системы. Полученные результаты сведите в таблицу. Постройте графики зависимостей.

Импульсная характеристика:

- выберите исследуемую зависимость – «Импульсная характеристика»;

- установите параметры системы;

- нажмите кнопку «Рассчитать/построить»;

- зарисуйте импульсную характеристику системы.

Изменяя параметры системы, исследуйте зависимость импульсной характеристики от параметров системы.

Годограф Найквиста:

- выберите исследуемую зависимость – «Годограф Найквиста»;

- установите параметры системы;

- нажмите кнопку «Рассчитать/построить»;

- зарисуйте годограф Найквиста для положительной полосы частот (ветвь годографа для отрицательных частот можно исключить, выключив на графике SHOW→NEGATIVE FREQUENCES);

- запишите значения запасов устойчивости и соответствующие им частоты.

Изменяя параметры системы, исследуйте зависимость исследуемых параметров от параметров системы. Полученные результаты сведите в таблицу.

Логарифмические АЧХ и ФЧХ:

- выберите исследуемую зависимость – «Логарифмические АЧХ и ФЧХ»;

- установите параметры системы;

- нажмите кнопку «Рассчитать/построить»;
- зарисуйте логарифмические АЧХ и ФЧХ;
- определите значения частот ω_{cp} , $\omega_{кр}$ и запасы устойчивости по фазе

и амплитуде.

Изменяя параметры системы, исследуйте зависимость исследуемых параметров от параметров системы. Полученные результаты сведите в таблицу.

Реакция на воздействие:

- выберите исследуемую зависимость – «Реакция на воздействие»;
- установите параметры системы;
- исследуйте реакцию системы на квадратичное воздействие, изменяя коэффициенты воздействия $Y(t) = a * t^2 + b * t + c$;
- исследуйте реакцию системы на линейное воздействие, задав коэффициент $a=0$;
- исследуйте реакцию системы на постоянное воздействие, задав коэффициенты $a=0$; $b=0$;
- зафиксируйте значения ошибок системы по положению, скорости и ускорению (синяя линия – задающее воздействие; зеленая – ошибка слежения).

Изменяя параметры системы и задающего воздействия, исследуйте зависимость величины ошибки от параметров системы и задающего воздействия. Полученные результаты сведите в таблицу. Постройте графики зависимостей.

7. СОДЕРЖАНИЕ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

7.1. Исследование статической линейной системы (ЧАП)

7.1.1 Исследовать зависимость показателей качества следящей системы от постоянной времени фильтра системы и коэффициента усиления разомкнутого контура:

- длительность переходного процесса;
- устойчивость и запасы устойчивости;
- точность (в зависимости от постоянной времени фильтра, коэффициента усиления разомкнутого контура и параметров задающего воздействия).

В качестве фильтров использовать апериодическое звено 1-го порядка (звено 2) и пропорционально-интегрирующее звено.

7.2. Исследование астатической системы ЧАП

7.2.1. Исследовать зависимость показателей качества следящей системы от постоянной времени фильтра системы и коэффициента усиления разомкнутого контура:

- устойчивость и запасы устойчивости;
- точность (в зависимости от постоянной времени фильтра, коэффициента усиления разомкнутого контура и параметров задающего воздействия).

В качестве фильтров использовать апериодическое звено 1-го порядка (звено 2) и пропорционально-интегрирующее звено.

7.3. Исследование системы ФАПЧ с астатизмом 1-го порядка

7.3.1. Подключить в качестве фильтра системы апериодическое звено 1-го порядка (звено 2) и исследовать:

- зависимость величины перерегулирования от постоянных времени фильтра и коэффициента усиления системы;
- устойчивость и запасы устойчивости.

7.3.2 Подключить в качестве фильтра системы поочередно апериодическое звено 1-го порядка (звено 2) и пропорционально-интегрирующее звено и исследовать:

- точность в зависимости от постоянных времени фильтров и параметров задающего воздействия.

7.4. Исследование системы ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка

7.4.1. Подключить в качестве фильтра системы безынерционное звено (звено 1) и установить постоянную времени фазового дискриминатора T , равной нулю.

7.4.2. Исследовать переходную и логарифмические характеристики.

7.4.3. Повторить исследования при постоянной времени фазового дискриминатора $T = 1$ с.

7.4.4. Сделать выводы об устойчивости системы.

7.4.5. Определить тип звена, при котором обеспечивается устойчивость системы; подключить звено и исследовать переходную и логарифмические характеристики.

8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

8.1. Цель работы.

8.2. Модели исследуемых систем.

8.3. Результаты исследований (характеристики, таблицы, графики зависимостей):

- статической линейной системы (ЧАП);
- астатической линейной системы (ЧАП);
- системы ФАПЧ с астатизмом 1-го порядка;
- системы ФАПЧ с астатизмом 2-го порядка.

8.4. Выводы.

9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Поясните принцип работы следящей системы и назначение элементов функциональной и структурной схем.
2. Дайте определение передаточной функции, переходной функции, поясните их назначение. Как связаны передаточные функции замкнутой и разомкнутой систем?
3. Дайте характеристику ошибкам установившегося режима в статической и астатической системах. Каковы физические причины возникновения ошибок в установившемся режиме?
4. С какой целью при анализе следящих систем определяются коэффициенты ошибки и какова их связь с понятием астатизма системы?
5. Что такое переходной режим работы ЛСС и чем он характеризуется?
6. Каковы физические причины потери устойчивости в ЛСС?
7. Что такое АФЧХ, годограф, ЛАЧХ, ЛАХ, их связь и назначение при исследовании ЛСС?
8. Как определяются w_{cp} , $w_{кр}$, w_c , запасы устойчивости по частотным и переходным характеристикам ?
9. Поясните результаты исследований линейных моделей следящих систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учебник для вузов. – М.: Высш. шк., 1990.
2. Первачев С.В. Радиоавтоматика: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1982.
3. Радиоавтоматика: Учеб. пособие для студ.вузов спец. Радиотехника»/ Под ред. В.А. Бесекерского.– М.: Высш. шк., 1985.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.Г. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975.
5. Артемьев В.М. Справочное пособие по методам исследования радиоэлектронных следящих систем. – Мн.: Выш. шк., 1984.
6. Яшугин Е.А. Теория линейных непрерывных систем автоматического управления в вопросах и ответах : Справ. пособие. – Мн.: Выш. шк., 1986.
7. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления / Под ред. В.А. Бесекерского. – М.: Наука, 1978.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ
СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ**

Методические указания
к лабораторной работе по курсу «Радиоавтоматика» для студентов
специальностей 1-39 01 01 «Радиотехника», 1-39 01 02 «Радиоэлектронные
системы» и курсу «Автоматика информационных систем» для студентов
специальности 1-39 01 03 «Радиоинформатика»

Составители:

Ганкевич Сергей Антонович,
Демидович Геннадий Николаевич

Редактор Н.В. Гриневич
Корректор Е.Н. Батурчик

Подписано в печать 02.05.2005
Гарнитура «Таймс».
Уч.-изд. л. 1,3.

Формат 60x84 1/16.
Печать ризографическая.
Тираж 200 экз.

Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 1,98.
Заказ 55.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.
Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0131518 от 30.04.2004.
220013, Минск, П. Бровки, 6