

А. И. СОКОЛОВ, Ю. С. ЮРЧЕНКО

# РАДИОАВТОМАТИКА

*Рекомендовано  
Учебно-методическим объединением вузов  
Российской Федерации по образованию в области  
радиотехники, электроники, биомедицинской техники  
и автоматизации в качестве учебного пособия  
для студентов высших учебных заведений,  
обучающихся по направлению «Радиотехника»*



Москва  
Издательский центр «Академия»  
2011

УДК 621.396.6(075.8)  
ББК 32.84я73  
С594

**Рецензенты:**

зам. начальника кафедры технической кибернетики  
Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского,  
канд. техн. наук, доц. *А. М. Поляев*;  
проф. кафедры радиосистем Новгородского государственного университе-  
та имени Ярослава Мудрого, д-р техн. наук *Л. А. Рассветлов*

**Соколов А.И.**

С594 Радиоавтоматика : учеб. пособие для студ. высш. учеб. за-  
ведений / А. И. Соколов, Ю. С. Юрченко. — М. : Издательский  
центр «Академия», 2010. — 272 с.

ISBN 978-5-7695-6916-6

Рассмотрена теория линейных и нелинейных систем радиоавтоматики. Раскрыты вопросы устойчивости непрерывных и дискретных систем, статистической оптимизации, нелинейной фильтрации и комплексирования радиотехнических и автономных систем. Дан анализ импульсных дискретных систем. Приведены примеры построения аналоговых и цифровых устройств радиоавтоматики.

Для студентов учреждений высшего профессионального образования. Может быть полезно для специалистов в области радиолокации, радиоуправления, радионавигации и связи.

УДК 621.396.6(075.8)  
ББК 32.84я73

*Оригинал-макет данного издания является собственностью  
Издательского центра «Академия», и его воспроизведение любым способом  
без согласия правообладателя запрещается*

ISBN 978-5-7695-6916-6

© Соколов А.И., Юрченко Ю.С., 2011  
© Образовательно-издательский центр «Академия», 2011  
© Оформление. Издательский центр «Академия», 2011

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АИМ	— амплитудно-импульсная модуляция
АПЧ	— автоподстройка частоты
АФХ	— амплитудно-фазовая характеристика
АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика
ВДУ	— векторное дифференциальное уравнение
ВУ	— вычислительное устройство
Г	— гетеродин
ГНСС	— глобальная навигационная спутниковая система
ИИЭ	— идеальный импульсный элемент
ИНС	— инерциальная навигационная система
ИУ	— исполнительное устройство
ИЭ	— импульсный элемент
КЦ	— корректирующая цепь
ЛАХ	— логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
ЛФХ	— логарифмическая фазово-частотная характеристика
ЛХ	— логарифмическая характеристика
НЭ	— нелинейный элемент
ОУ	— объект управления
ПВ	— плотность вероятности
ПС	— пространство состояний
ПФ	— передаточная функция
САР	— система автоматического регулирования
САУ	— система автоматического управления
См	— смеситель
СУ	— система управления
УГ	— управляемый генератор
УПЧ	— усилитель промежуточной частоты
УРА	— устройство радиоавтоматики
ФАПЧ	— фазовая автоподстройка частоты
ФД	— фазовый дискриминатор
ФНП	— фиксатор нулевого порядка
ФНЧ	— фильтр нижних частот
ФФ	— формирующий фильтр
ФЧХ	— фазово-частотная характеристика
ФЭ	— формирующий элемент
ЧД	— частотный дискриминатор
ЧЭ	— чувствительный элемент

## ВВЕДЕНИЕ

В окружающем нас мире действует множество систем управления (СУ): биологических, технических, общественных и др. Технические СУ весьма многообразны: от простейшего терморегулятора утюга до сложнейшей системы управления луноходом. Появление технических СУ связано с решением задач регулирования работой паровых машин и других двигателей. Достаточно вспомнить такие изобретения, как поплавковый регулятор уровня воды в котле паровой машины (русский механик И. И. Ползунов, 1765 г.) и центробежный регулятор скорости вращения махового колеса паровой машины (английский изобретатель Дж. Уатт, 1784 г.). Данные системы позволяли автоматизировать те или иные процессы, т. е. исключить участие в них человека. Поскольку регулируемые процессы были относительно медленными, возможность участия в них человека-оператора принципиально сохранялась, что не стимулировало быстрого развития технических СУ.

В XX в. ситуация изменилась коренным образом: появились и стали быстро развиваться авиация, ракетная техника, радиосвязь, локация и радионавигация. Требования к быстрдействию человека-оператора возросли на порядок, и на помощь пришли кибернетические системы. Н. Винер определил кибернетику как науку об управлении и связи. Совместное развитие СУ и радиотехники привело к появлению систем радиоавтоматики (СУ техническими объектами без участия человека с использованием радиотехнических средств). Первые системы радиоавтоматики появились в 1930-е годы. Это были системы автоматического регулирования усилением радиоприемников, автоматической подстройки частоты генераторов и др. В настоящее время системы радиоавтоматики позволяют автоматизировать процессы синхронизации частоты и времени, различные измерительные процессы, управление подвижными объектами. Дисциплина, изучающая такие системы, называется радиоавтоматикой.

Методика изложения материала в данном учебном пособии соответствует курсу, читаемому более 50 лет на кафедре «Радиотехнические системы» СПбГЭТУ (ЛЭТИ). Системотехническая составляющая дисциплины основывается на общей теории управления, теории оценивания случайных процессов и теории статистической радиотехники. Схемотехническая составляющая дисциплины основывается на методах обработки радиосигналов с учетом разнообраз-

ной помеховой обстановки и состояния современной элементной базы.

В гл. 1 данного учебного пособия излагается теория линейных СУ в частотной области и метод пространства состояний. В гл. 2 исследуются вопросы устойчивости непрерывных и дискретных систем. Гл. 3 посвящена анализу динамических и случайных ошибок. Структурные и функциональные схемы устройств радиоавтоматики, реализуемые аппаратными и программными средствами, представлены в гл. 4. В гл. 5 и 6 описываются методы оптимизации структуры и параметров устройств радиоавтоматики, а также способы повышения их точности и надежности при оптимальном объединении (комплексировании) радиотехнических и автономных датчиков. Специфика нелинейных систем радиоавтоматики рассматривается в гл. 7.

Непрерывные и дискретные системы изучаются параллельно на протяжении всего курса, а некоторые дополнительные аспекты построения импульсных и дискретных систем освещаются в гл. 8.

## ОПИСАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ

## 1.1. Классификация и показатели качества систем радиоавтоматики

Любая СУ независимо от своего назначения обязательно содержит объект управления (ОУ). При наличии возмущающих факторов, действующих в том числе и на ОУ, его состояние  $Y$  необходимо контролировать. В зависимости от цели управления формируется задающее воздействие  $G$ , в соответствии с которым и с учетом текущего значения  $Y$  состояние ОУ изменяется. При этом СУ обязательно выполняет четыре функции:

- получение информации о задающем воздействии  $G$ ;
- получение информации о состоянии объекта управления  $Y$ ;
- анализ информации и выработку решения;
- исполнение решения.

Нарушение какой-либо из перечисленных функций ведет к невыполнению задач управления, т. е. к потере работоспособности СУ. Любая СУ действует согласно обобщенной функциональной схеме, приведенной на рис. 1.1.

Информация о задающем воздействии  $G$  и состоянии объекта управления  $Y$  воспринимается и анализируется чувствительным элементом (ЧЭ). Анализ информации и выработка решения могут потребовать дополнительных вычислений, поэтому в схеме предусмотрено вычислительное устройство (ВУ). Далее принятое решение исполняется с помощью исполнительного устройства (ИУ) и в виде управляющего воздействия  $U$  действует на ОУ, изменяя его состояние  $Y$ . Функциональные элементы ЧЭ, ВУ и ИУ, предназначенные для формирования управляющего воздействия  $U$ , представляют собой управляющее устройство (УУ). СУ может функционировать при наличии возмущающих воздействий (на рис. 1.1 показана ситуация, при

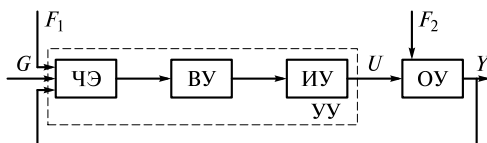


Рис. 1.1. Обобщенная функциональная схема СУ

которой возмущающие воздействия  $F_1$  и  $F_2$  влияют на состояние ОУ и работу ЧЭ).

Главной особенностью обобщенной функциональной схемы СУ является наличие *обратной связи*, связывающей ОУ и ЧЭ. Именно в этом заключается принципиальное отличие СУ от прочих систем. Обратная связь в СУ, с одной стороны, упрощает задачу изменения состояния ОУ (оно контролируется), а, с другой стороны, требует решения проблем, связанных с обеспечением устойчивости СУ.

В системах радиоавтоматики (радиотехнических СУ) задающее воздействие  $G$  формируется в приемном тракте радиоканала, а возмущающее воздействие  $F$  должно учитывать шум входных цепей радиоприемного устройства, помехи радиоканала и другие факторы. Различают три группы систем радиоавтоматики:

системы синхронизации;

следящие измерители параметров радиосигнала и координат объектов;

системы управления подвижными объектами.

К системам радиоавтоматики первой группы можно отнести системы временной синхронизации (например, кадровой и строчной синхронизации в телевизоре).

Системы радиоавтоматики второй группы широко используются в радиолокации и радионавигации. Например, в радиолокационной станции содержатся следящие измерители дальности и угловых координат целей (азимута и угла места). В приемнике спутниковой радионавигационной системы для каждого спутникового радиоканала имеются следящий измеритель задержки времени приема радиосигнала от спутника и система слежения за несущей радиосигнала.

Третья группа систем радиоавтоматики включает в себя системы радиоуправления движущимися объектами. В качестве примера можно привести систему автоматической посадки самолета, действующую при неблагоприятных погодных условиях. К этой же группе относятся системы оборонного назначения (системы самонаведения ракет, торпед и т. п.).

Помимо систем радиоавтоматики, множество СУ включает в себя более широкий класс систем, решающих задачу воспроизведения задающего воздействия:  $Y \rightarrow G$ . Такие системы обычно называют *системами автоматического регулирования* (САР), или *системами автоматического управления* (САУ).

В качестве примера СУ радиотехнического назначения рассмотрим систему автоподстройки частоты (АПЧ) генератора (рис. 1.2).

Система АПЧ содержит приемник (П) с антенной (А), причем канал радиоприема и входные цепи приемника подвержены возмущающим воздействиям  $F$ . Как следует из названия системы, информационным параметром принимаемого радиосигнала  $A \sin(\omega t + \varphi)$

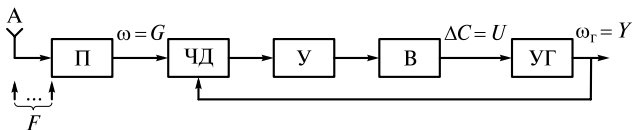


Рис. 1.2. Функциональная схема системы АФЧ

является частота  $\omega$ , которая и выполняет роль задающего воздействия  $G$ . Объектом управления является управляемый генератор (УГ), состояние которого характеризуется частотой  $\omega_r$  ( $\omega_r = Y$ ). В качестве чувствительного элемента используется устройство, преобразующее разность частот  $\omega - \omega_r$  в напряжение (частотный дискриминатор — ЧД). Это напряжение поступает на усилитель (У) и изменяет емкость варикапа (В), представляющего собой исполнительное устройство. Изменение емкости варикапа  $\Delta C$  можно рассматривать как управляющее воздействие  $U$ . Варикап включен во времязадающую цепь УГ, поэтому изменение  $\Delta C$  ведет к соответствующему изменению  $\omega_r$ . Задачей системы АФЧ является сведение частот:  $\omega_r \rightarrow \omega$  (т.е.  $Y \rightarrow G$ ).

Проведем классификацию СУ радиотехнического назначения.

По характеру задающего воздействия различают:

системы стабилизации ( $G = \text{const}$ );

системы программного управления ( $G$  — известная функция времени);

следающие системы ( $G$  — неизвестная функция времени).

Например, система АФЧ радиоприемника обычно представляет собой систему стабилизации промежуточной частоты принятого сигнала (рис. 1.3). Разность частот гетеродина  $\omega_r$  и сигнала  $\omega$  должна быть равной  $\omega_{п.ч.}$ . В отличие схемы, приведенной на рис. 1.2, здесь задающим воздействием  $G$  является выбранная промежуточная частота  $\omega_{п.ч.} = \text{const}$ . Возмущающим воздействием  $F$  в данном случае является нестабильность частоты гетеродина. Если гетеродин (Г), смеситель (См) и усилитель промежуточной частоты (УПЧ) представить в виде управляемого генератора (УГ), то функциональная схема такой системы будет полностью соответствовать обобщенной функциональной схеме СУ, приведенной на рис. 1.1.

Примером системы программного управления является бортовой комплекс управления полетом самолета по заданному маршруту с использованием радионавигационной системы.

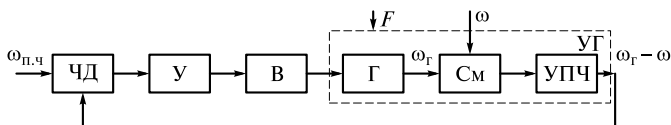


Рис. 1.3. Функциональная схема системы стабилизации промежуточной частоты радиоприемника



Наибольший интерес представляют следующие системы, для которых закон изменения задающего воздействия  $G(t)$  имеет общий характер. Приведенная на рис. 1.2 система АПЧ представляет собой следящую систему.

В зависимости от полноты априорных сведений относительно  $G(t)$  возможны две ситуации:

- известен вид функции  $G(t)$ , но неизвестны ее параметры;
- вид функции  $G(t)$  неизвестен.

В первом случае задающее воздействие можно считать регулярным, во втором — случайным. Процесс проектирования СУ начинается с выбора модели задающего воздействия.

В зависимости от размерности состояния ОУ различают одномерные ( $Y$  — скаляр) и многомерные ( $Y$  — вектор) СУ. Рассмотренная система АПЧ — одномерная СУ. Системы автоматического управления полетом самолета или измерения его координат — многомерные СУ (состояние ОУ характеризуется пространственными координатами и их производными).

Все реальные СУ нелинейные хотя бы потому, что протяженность рабочей характеристики ЧЭ (апертура) конечна. Тем не менее для многих СУ приближенно справедлива линейная математическая модель. Если же такое приближение неправомерно, приходится работать с нелинейной моделью СУ.

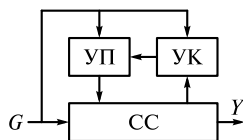
Иногда в дополнение к введенному понятию следящей системы используют более общее понятие *поисково-следящего измерителя*. Если задающее воздействие  $G$  оказывается вне апертуры рабочей характеристики ЧЭ, происходит срыв слежения. Необходимы дополнительные действия по обнаружению этого явления и совмещению апертуры рабочей характеристики ЧЭ с задающим воздействием  $G$  (ввод следящей системы в режим слежения). Указанные действия выполняют дополнительные устройства контроля слежения и поиска, показанные на рис. 1.4.

Устройства контроля слежения и поиска решают задачу обнаружения задающего воздействия  $G$  в пределах апертуры рабочей характеристики ЧЭ (контроль слежения) либо в пределах всего априорного диапазона  $G$  (поиск). Задачи обнаружения (классификации, распознавания образов) освещаются в других учебных курсах и здесь не рассматриваются.

В зависимости от сложности реализации СУ и специфических особенностей ОУ различают системы с постоянными и переменными параметрами.

Рис. 1.4. Функциональная схема поисково-следящего измерителя:

СС — следящая система; УП — устройство поиска; УК — устройство контроля



В зависимости от характера формирования задающего воздействия  $G$  и способа реализации СУ различают системы непрерывного, импульсного и дискретного действия. Заметим, что большинство реальных процессов развивается во времени непрерывно. Дискретизация процессов во времени может возникнуть либо в силу специфики измерительного процесса (например, импульсный метод измерения дальности в радиолокационной станции), либо в случае цифровой реализации СУ. Очевидно, что цифровые системы являются дискретными (поскольку имеется дискретизация во времени) и нелинейными (поскольку имеется квантование по уровню).

Качество работы СУ оценивают с помощью технических характеристик, основные из которых называют показателями качества. К ним относятся устойчивость, качество переходного процесса, точность, помехоустойчивость.

Наличие в СУ обратной связи требует обеспечения ее устойчивости; работоспособная СУ безусловно должна быть устойчивой. Устойчивость линейной СУ — характеристика бинарная (система либо устойчива, либо неустойчива). В нелинейных системах возможно существование незатухающих автоколебаний при сохранении работоспособности. В случае возникновения проблем, связанных с устойчивостью СУ, решается задача коррекции. При этом добавляются специальные корректирующие элементы в целях улучшения технических характеристик СУ.

На начальном этапе работы СУ, как правило, протекает переходный процесс, при котором ОУ переходит из начального в установившееся состояние. Желательно, чтобы этот процесс протекал быстро и по возможности монотонно (иногда допускается слабоколебательный переходный процесс). Качество переходного процесса СУ зависит от степени удаленности ее от границы устойчивости (от запаса устойчивости).

Точность СУ характеризуется ошибкой воспроизведения задающего воздействия в установившемся режиме работы. Если ошибка воспроизведения постоянного задающего воздействия ( $G = \text{const}$ ) равна нулю, то СУ называют *астиатической* (альтернатива — *статическая СУ*).

Задача обеспечения требуемой помехоустойчивости СУ возникает при наличии возмущающих воздействий (например,  $F_1$  на рис. 1.1). В устройствах радиотехнического назначения, т. е. в системах радиоавтоматики, задающее воздействие  $G$  часто поступает на вход ЧЭ в аддитивной смеси с помехой, которую обычно аппроксимируют белым шумом. Причиной возникновения такой помехи, как правило, являются тепловые шумы входных цепей радиоприемного устройства. Помехоустойчивость СУ иногда определяют по минимальному отношению сигнал/помеха, при котором еще сохраняются заданные технические характеристики системы. Более общей характеристикой помехоустойчивости СУ является дисперсия флюктуационной

(обусловленной действием помехи) составляющей ошибки воспроизведения задающего воздействия. Очевидно, что чем меньше эта дисперсия при заданном отношении сигнал/помеха, тем выше помехоустойчивость СУ.

## 1.2. Передаточные функции СУ

Решение задачи определения показателей качества СУ основывается на исследовании математических моделей, описание которых возможно в частотной и временной областях. В первом случае используются передаточные функции (ПФ) системы (ее математической модели), во втором — дифференциальные уравнения.

Определим ПФ СУ с помощью преобразования Лапласа:

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-pt} dt = L\{f(t)\},$$

где  $f(t)$  — функция времени (оригинал);  $F(p)$  — изображение функции  $f(t)$  по Лапласу;  $L\{\cdot\}$  — оператор преобразования Лапласа ( $L^{-1}\{\cdot\}$  — оператор обратного преобразования Лапласа).

Описание систем в частотной области сопровождается рядом ограничений, происхождение которых обязано преобразованию Лапласа и его свойствам. Напомним основные свойства преобразования.

1. Свойство линейности:

$$L\{a_1 f_1(t) + a_2 f_2(t)\} = a_1 L\{f_1(t)\} + a_2 L\{f_2(t)\} = a_1 F_1(p) + a_2 F_2(p),$$

где  $a_1$  и  $a_2$  — некоторые коэффициенты, не зависящие от времени.

Из свойства линейности следует существенное ограничение на описываемую систему: в частотной области возможно описание систем с постоянными параметрами; для описания систем с переменными параметрами передаточные функции использовать в общем случае нельзя.

2. Изображение производной от оригинала

$$L\left\{\frac{df(t)}{dt}\right\} = pF(p) - f(t_0),$$

где  $f(t_0)$  — значение функции  $f(t)$  в начальный отсчет времени (начальное условие).

Применение преобразования Лапласа к дифференциальным уравнениям обычно выполняется в предположении о нулевых начальных условиях. При описании систем с помощью ПФ также используется это предположение.

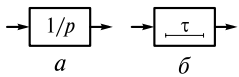


Рис. 1.5. Обозначение интегратора (а) и элемента задержки (б) на структурной схеме

### 3. Изображение интеграла от оригинала

$$L\left\{\int_{t_0}^t f(t_1) dt_1\right\} = \frac{1}{p} F(p).$$

Это свойство полезно для обоснования обозначения интегратора на структурной схеме (рис. 1.5, а).

### 4. Смещение оригинала во времени

$$L\{f(t - \tau)\} = e^{-p\tau} F(p).$$

В дискретных системах присутствует элемент задержки, который будем обозначать так, как показано на рис. 1.5, б.

### 5. Конечное (предельное) значение оригинала

$$\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = \lim_{p \rightarrow 0} pF(p).$$

Это свойство преобразования Лапласа оказывается полезным при анализе точности СУ.

Рассмотрим СУ со скалярным воздействием  $g(t)$  и реакцией  $y(t)$ . Допустим, что известно описание СУ во временной области в виде дифференциального уравнения  $n$ -го порядка:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_0 y(t) = \\ = b_m \frac{d^m g(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} g(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dg(t)}{dt} + b_0 g(t), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $a_0, \dots, a_n$  и  $b_0, \dots, b_m$  — постоянные коэффициенты.

Начальные условия дифференциального уравнения (1.1)

$$y(t_0), \left. \frac{dy(t)}{dt} \right|_{t=t_0}, \dots, \left. \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} \right|_{t=t_0}$$

будем полагать нулевыми. Применим к уравнению (1.1) преобразование Лапласа:

$$\begin{aligned} y(p)(a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0) = \\ = g(p)(b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0), \end{aligned}$$

где  $y(p)$  и  $g(p)$  — изображения по Лапласу соответственно для  $y(t)$  и  $g(t)$ .

Определим ПФ СУ как отношение изображения по Лапласу реакции системы к изображению воздействия:

$$W(p) = \frac{y(p)}{g(p)} = \frac{b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0} = \frac{C(p)}{D(p)}. \quad (1.2)$$

Возможно и другое определение ПФ системы: изображение по Лапласу реакции системы на  $\delta$ -функцию, т.е. изображение весовой функции. Поскольку  $L\{\delta(t)\} = 1$ , такое определение ПФ не противоречит (1.2). Заметим, что выражение (1.2) представляет собой дробную рациональную функцию.

Рассмотрим некоторые общие свойства ПФ.

1. Из условия физической реализуемости системы следует ограничение: порядок многочлена числителя  $C(p)$  ПФ (1.2) не может превышать порядка многочлена знаменателя  $D(p)$ , т.е.  $m \leq n$ .

2. При  $p = 0$  ПФ (1.2) превращается в коэффициент усиления

$$W(p) \Big|_{p=0} = \frac{b_0}{a_0} = K,$$

который для рассматриваемой СУ в зависимости от ее назначения либо равен 1 (в астатических системах), либо близок к 1 (в статических системах).

3. ПФ (1.2) можно представить в виде

$$W(p) = \frac{b_m (p - q_1) \dots (p - q_m)}{a_n (p - p_1) \dots (p - p_n)},$$

где  $q_1, \dots, q_m$  — корни многочлена  $C(p)$ , называемые нулями;  $p_1, \dots, p_n$  — корни многочлена  $D(p)$ , называемые полюсами ПФ.

Обобщенную функциональную схему линейной СУ при скалярных воздействиях  $g(t)$  и реакции  $y(t)$  можно заменить обобщенной структурной схемой, показанной на рис. 1.6.

Обобщенная структурная схема отражает принцип управления по рассогласованию: разность задающего воздействия и реакции системы  $e(t) = g(t) - y(t)$  представляет собой сигнал ошибки (или рассогласования) СУ, который используется далее для решения основной задачи системы  $y(t) \rightarrow g(t)$ . Кроме того, схема наглядно демонстрирует наличие отрицательной обратной связи в контуре управления. Учитывая наличие отрицательной обратной связи, замыкающей контур СУ, ПФ  $W(p)$  в дальнейшем будем называть ПФ замкнутой СУ. Определим также ПФ разомкнутой СУ  $W_p(p)$  и ПФ по ошибке  $W_e(p)$ :

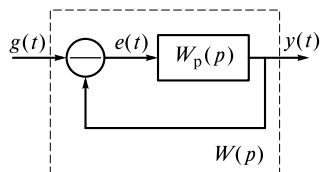


Рис. 1.6. Обобщенная структурная схема СУ

$$W_p(p) = \frac{y(p)}{e(p)}; \quad W_e(p) = \frac{e(p)}{g(p)},$$

где  $y(p)$ ,  $e(p)$  и  $g(p)$  — изображения по Лапласу соответственно от  $y(t)$ ,  $e(t)$  и  $g(t)$ .

Все ПФ однозначно связаны друг с другом. Для определения выражений, устанавливающих такую связь, запишем уравнения СУ, которые следуют из обобщенной структурной схемы, показанной на рис. 1.6:

$$\begin{cases} y(p) = e(p)W_p(p); \\ e(p) = g(p) - y(p). \end{cases} \quad (1.3)$$

Подстановка второго уравнения системы (1.3) в первое позволяет записать

$$W(p) = \frac{y(p)}{g(p)} = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)}. \quad (1.4)$$

Разделив левую и правую части второго уравнения системы (1.3) на  $g(p)$ , получим

$$W_e(p) = 1 - W(p).$$

Отсюда с учетом (1.4)

$$W_e(p) = \frac{1}{1 + W_p(p)}.$$

Любая из определенных здесь ПФ может использоваться для описания и анализа СУ. В инженерной практике ПФ замкнутой системы обычно используют для анализа устойчивости и помехоустойчивости, ПФ разомкнутой системы — для оценки качества переходных процессов, а ПФ по ошибке — для анализа точности СУ.

### 1.3. Частотные характеристики СУ

Частотная передаточная функция системы получается из передаточной функции  $W(p)$  заменой  $p = j\omega$ :

$$W(j\omega) = W(p) \Big|_{p=j\omega}.$$

При этом возможно использование любой ПФ СУ из определенных в подразд. 1.2.

Формально частотная передаточная функция представляет собой отношение изображения по Фурье реакции системы к изображению

воздействия. Однако следует иметь в виду, что передаточная функция  $W(p)$  существует как для устойчивых, так и для неустойчивых систем, в то время как частотная передаточная функция  $W(j\omega)$  имеет смысл только для устойчивых систем.

Являясь функцией комплексной переменной,  $W(j\omega)$  представима в алгебраической и показательной формах:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = |W(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)},$$

где  $P(\omega)$  и  $Q(\omega)$  — соответственно вещественная и мнимая частотные характеристики системы;  $|W(j\omega)|$  и  $\varphi(\omega)$  — амплитудная и фазовая частотные характеристики системы (АЧХ и ФЧХ).

Связь между двумя формами представления  $W(j\omega)$  устанавливают следующие соотношения:

$$|W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \quad \varphi(\omega) = \arctg\left(\frac{Q(\omega)}{P(\omega)}\right);$$

$$P(\omega) = |W(j\omega)|\cos\varphi(\omega); \quad Q(\omega) = |W(j\omega)|\sin\varphi(\omega),$$

из которых следует, что  $|W(j\omega)|$  и  $P(\omega)$  — четные функции частоты, а  $\varphi(\omega)$  и  $Q(\omega)$  — нечетные.

Частотная передаточная функция системы полностью определяет прохождение гармонического колебания через систему: АЧХ определяет зависимость амплитуды выходного колебания от частоты (при постоянной и равной единице амплитуде входного колебания), а ФЧХ — фазовый сдвиг между выходным и входным колебаниями как функцию частоты.

На рис. 1.7, а показаны АЧХ, а на рис. 1.7, б — ФЧХ двух замкнутых систем (СУ1 и СУ2), имеющих ПФ в разомкнутом состоянии соответственно

$$W_p(p) = \frac{4}{1+0,5p}; \quad W_p(p) = \frac{4(1+0,5p)}{p(1+2p)}. \quad (1.5)$$

По виду АЧХ нетрудно сделать некоторые выводы относительно показателей качества СУ. Во-первых, АЧХ СУ2 имеет резонансный пик, что свидетельствует о колебательном характере переходного процесса (классификация переходных процессов приведена в подразд. 1.5). АЧХ СУ1 не имеет резонансного пика, что свидетельствует о монотонном характере переходного процесса. Во-вторых, полоса СУ2 уже, следовательно, переходный процесс в этой системе протекает медленнее, чем в СУ1. В-третьих, вблизи нулевой частоты значение АЧХ СУ1 отличается от единицы, следовательно, эта система воспроизводит постоянное задающее воздействие с ошибкой,

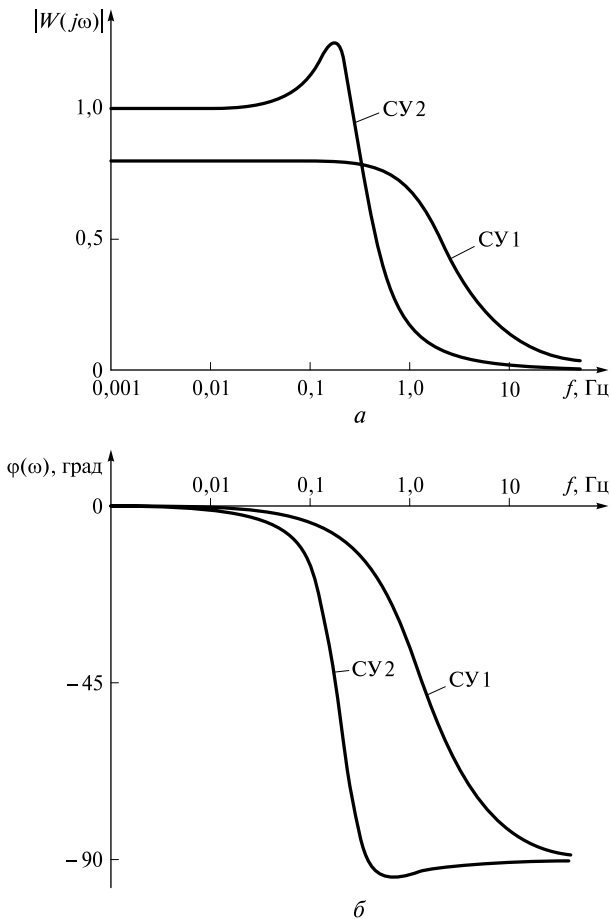


Рис. 1.7. АЧХ (а) и ФЧХ (б) СУ с ПФ (1.5)

т. е. система является статической. Значение АЧХ СУ2 при  $\omega \rightarrow 0$  стремится к единице, т. е. система астатическая.

Весьма важным для анализа систем является следующее обстоятельство: СУ представляет собой фильтр нижних частот (ФНЧ), причем вид АЧХ и ФЧХ при  $\omega \rightarrow 0$  определяет точность СУ, а вблизи верхней границы полосы пропускания ФНЧ — динамические характеристики системы (качество переходного процесса). Широкое использование частотных характеристик в инженерной практике началось с публикаций работ Г. Найквиста (1932 г.), А. В. Михайлова (1938 г.), Г. Бode (1945 г.) и ряда других авторов.

Частотные характеристики могут быть изображены графически на комплексной плоскости в виде годографа. При построении годо-



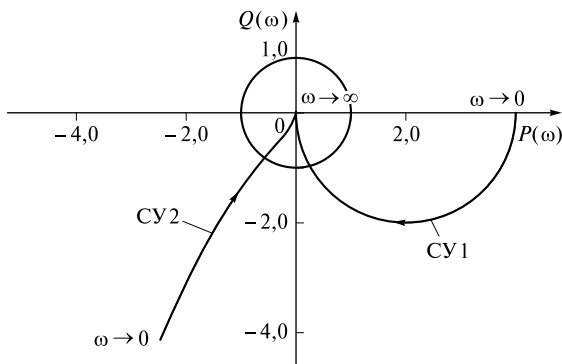


Рис. 1.8. Годографы Найквиста СУ с ПФ (1.5)

графа используют либо прямоугольные координаты  $P(\omega)$  и  $Q(\omega)$ , либо полярные  $|W(j\omega)|$  и  $\varphi(\omega)$ . Годограф называют также амплитудно-фазовой характеристикой (АФХ). Годограф, соответствующий ПФ разомкнутой СУ, называют годографом Найквиста. Годографы Найквиста для двух СУ с ПФ (1.5) показаны на рис. 1.8.

Для СУ1, являющейся статической системой, годограф начинается (при  $\omega \rightarrow 0$ ) на положительной вещественной полуоси, а заканчивается (при  $\omega \rightarrow \infty$ ) в начале координат (направление роста частоты  $\omega$  указывают стрелкой, иногда годограф снабжают частотными отметками).

При  $\omega \rightarrow \infty$  ФЧХ СУ приближается к уровню, кратному  $90^\circ$ , поэтому касательная к годографу в начале координат должна совпадать с одной из осей. Для астатических СУ частотная передаточная функция при  $\omega \rightarrow 0$  стремится к бесконечности (вещественной или мнимой), поэтому годографы Найквиста для статической и астатической СУ существенно отличаются друг от друга (отличие АЧХ на рис. 1.7 при  $\omega \rightarrow 0$  заметно лишь при небольшом коэффициенте усиления СУ).

Динамические характеристики систем зависят от места пересечения годографом единичной окружности. Таким образом, свойства СУ определяют поведением годографа при  $\omega \rightarrow 0$  и вблизи единичной окружности. Это обстоятельство часто используют для приближенного построения годографа Найквиста.

С учетом четности  $P(\omega)$  и нечетности  $Q(\omega)$  годограф Найквиста для отрицательных частот представляют в виде зеркального изображения годографа для положительных значений частоты относительно вещественной оси.

При проектировании и исследовании СУ очень удобно использовать *логарифмические характеристики* (ЛХ), что объясняется простотой их построения. Эти характеристики иногда называют диаграммами Боде. ЛХ состоит из двух графиков: логарифмической

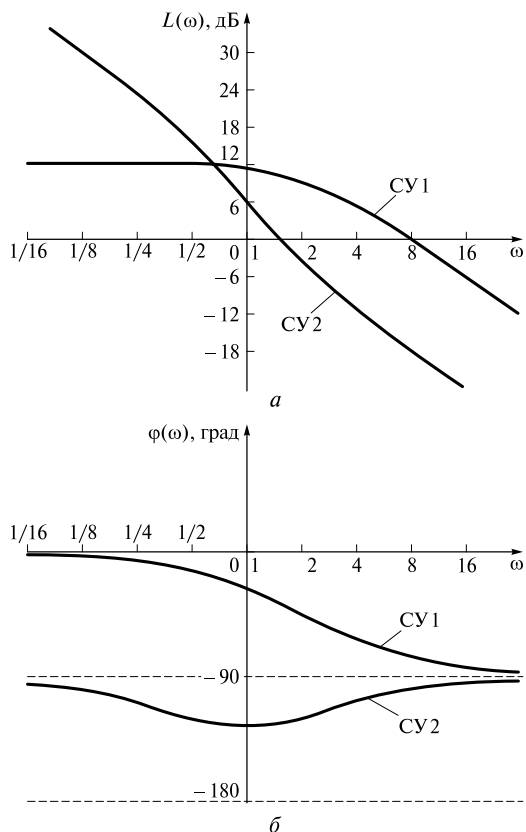


Рис. 1.9. ЛАХ (а) и ЛФХ (б) СУ с ПФ (1.5)

АЧХ (ЛАХ) и логарифмической ФЧХ (ЛФХ). Вид ЛХ для двух СУ с ПФ (1.5) показан на рис. 1.9.

Правила построения ЛАХ:

1) по оси абсцисс откладывают частоту  $\omega$  в логарифмическом масштабе; для узкополосных систем в качестве основания логарифма используют 2 (октавное разбиение оси частот), для широкополосных — 10 (декадное разбиение оси частот). Поскольку большинство систем радиоавтоматики относится к узкополосным системам, рекомендуется октавное разбиение оси частот;

2) по оси ординат откладывают значения модуля ПФ разомкнутой системы в децибелах:  $L(\omega) = 20 \lg |W_p(j\omega)|$ ;

3) ось абсцисс (ось частот) обязательно должна пересекать ось ординат в точке 0 дБ; ось ординат может пересекать ось частот в любой точке, но удобнее выбирать точку  $\omega = 1$  рад/с (далее единица измерения не указывается).