

## ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Основные термины и определения	5
2. Классификация систем автоматического управления	11
3. Передаточная функция обобщенной САУ	33
4. Передаточные функции типовых элементарных звеньев	40
5. Переходная функция	52
6. Частотные характеристики САУ	61
7. Частотные характеристики типовых элементарных звеньев	68
8. ЛАЧХ типовых элементарных звеньев	83
9. Звено 2-го порядка	94
10. Соединения звеньев	117
11. Частотные характеристики последовательного соединения звеньев	123
12. Частотные характеристики замкнутой системы	133
13. Характеристики параллельного соединения. ПИД-регулятор	138
14. Эквивалентные преобразования структурных схем	147
15. Устойчивость линейных систем	162
16. Достаточные условия устойчивости. Метод Ляпунова	164
17. Математические основы устойчивости	172
18. Критерий устойчивости Гурвица	180
19. Критерий устойчивости Линара-Шипара	192
20. Частотный критерий Михайлова	200
21. Моделирование линейных САУ в программной среде <i>VisSim</i>	221
22. Моделирование частотных характеристик типовых звеньев	238
Приложение 1. Работа в программной среде <i>VisSim</i>	254
1. Знакомство с интерфейсом программы	254
2. Симуляция модели	260
3. Работа с блоками	262
4. Визуализация результатов моделирования	267
5. Источники сигналов <i>Producer Blocks</i>	269
6. Устройства отображения <i>Consumer Blocks</i>	271
7. Аннотационные блоки	280
8. Динамические блоки	283
9. Блок Выражение <i>Expression</i>	287
10. Арифметические блоки	289
11. Преобразователи <i>Transcendental</i>	290
12. Логические функции <i>Boolean</i>	292
13. Нелинейные функции <i>Nonlinear</i>	293

Приложение 2. Типовой расчет № 1. Характеристики типовых элементарных звеньев	295
Приложение 3. Типовой расчет № 2 . Соединения типовых элементарных звеньев	338
Приложение 4. Курсовая работа на тему «Компьютерное моделирование линейных систем управления»	388
Библиографический список	425

## 1. Основные термины и определения

**Общая теория управления**, охватывающая как неживую, так и живую природу, является предметом науки **кибернетики**.

**Теория автоматического управления (ТАУ)** – это часть кибернетики. Она изучает автоматическое управление техническими объектами.

**Управление объектом** – это процесс воздействия на него с **целью**:

- 1) обеспечения требуемого течения процессов в нем либо
- 2) требуемого изменения его состояния

на основе переработки информации о состоянии объекта **в соответствии** с целью управления.

**Объект управления** может принадлежать:

- 1) к неживой природе, в частности быть техническим устройством;
- 2) к живой природе (коллектив людей, животное).

**Управление** может быть:

- 1) **ручным**, т.е. осуществляться самим человеком;
- 2) **автоматическим**, т.е. осуществляться без непосредственного воздействия человека.

**Управляющее устройство** (УУ) или **регулятор** (Р) – это техническое устройство, с помощью которого осуществляется автоматическое управление объектом.

**Система автоматического управления** (САУ) – это совокупность объекта управления и устройства управления УУ. В общем виде САУ может быть представлена в виде **структурной схемы**, представленной на рис 1.1.

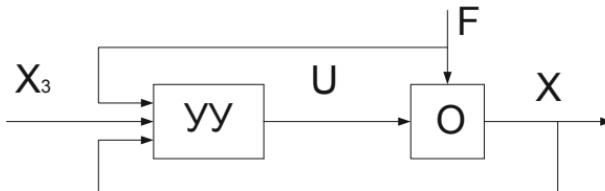


Рис. 1.1. Структурная схема САУ

Здесь **U** – управляющее воздействие; **F** – **возмущающее воздействие** (возмущение, помеха), которое изменяет состояние объекта, т.е. выходную величину САУ  $X_3$ , препятствуя управлению.

На вход УУ подаётся информация о выходной величине  $X$ , о возмущении  $F$  и задающее воздействие  $X_3$ .

УУ перерабатывает получаемую информацию по определенному заложенному в нем *алгоритму (закону)*. В результате на его выходе возникает *управляющее воздействие*.

Как сказано выше, на рис. 1.1 представлена структурная схема САУ. Какие же еще схемы существуют? Принята следующая общая классификация.

**Структурные** – схемы, дающие самое общее представление о составных частях системы и связях между ними. Визуально они представляют собой прямоугольники с надписями, соединенные стрелками. Примером структурных схем служат рис. 1.1 и 1.2.

**Функциональные** – более детальные схемы, на которых могут применяться условные графические элементы (УГО) отдельных элементов или фрагменты математического описания компонентов. Примеры функциональных схем приводятся в главе 2.

**Принципиальные** – состоят из реально существующих компонентов и служат основой конструкторской документации. Разработка схем данного вида выходит за рамки рассматриваемой дисциплины.

На рис. 1.2 показаны основные составные части управляющего устройства:

1) **чувствительные устройства (ЧУ)** – это измерительные устройства, датчики – служат для измерения подаваемых на управляющее устройство воздействий  $X$ ,  $X_3$  и  $F$ .

2) **вычислительное устройство (ВУ)** – реализует алгоритм работы УУ.

В простейшем случае это *аналоговое* устройство (сумматор, интегратор, компаратор, функциональный преобразователь). В более сложных случаях применяется *цифровая* обработка информации. Тогда ВУ состоит из 3 частей:

1) **аналого-цифровой преобразователь (АЦП)** – преобразует, как правило, аналоговые сигналы с ЧУ в цифровую форму;

2) ЭВМ – собственно вычислитель, рассчитывающий коды управляющего воздействия;

3) **цифроаналоговый преобразователь (ЦАП)** – преобразует код в аналоговый сигнал  $U$ , который и поступает на объект или на специальное устройство, являющееся посредником между регулятором и объектом (исполнительный механизм);

- 4) **исполнительные устройства (ИУ)** – предназначены для непосредственного управления объектом в соответствии с управляющим воздействием.

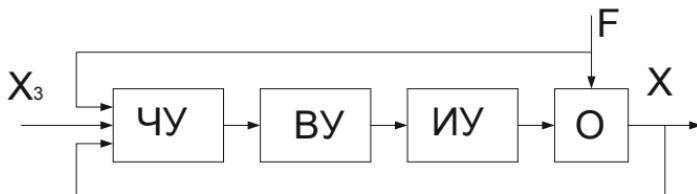


Рис. 1.2. Структурная схема САУ с детализацией компонентов регулятора

В ТАУ принято следующее допущение: все элементы САУ обладают **однонаправленностью действия**, они воздействуют лишь на *последующий* элемент системы, т.е. сигнал проходит только от входа к выходу элемента. Каждый последующий элемент *не оказывает влияния* на предыдущий.

Естественно, данное допущение является идеализацией. Например, размещение датчика скорости на валу двигателя неизбежно повлияет на его параметры (увеличит момент инерции), но данным обстоятельством пренебрегают.

**Связь в САУ** – это простейшая составная её часть, отображающая путь и направление передачи воздействия между элементами САУ.

Участок цепи от точки приложения входного воздействия до точки съема выходного сигнала в направлении распространения сигнала называется **основной прямой связью**.

**Дополнительная (местная) связь** – это контур, охватывающий один или несколько элементов основной цепи.

Местные связи бывают следующих **видов**:

- 1) **прямая** – если её направление совпадает с направлением главной связи;
- 2) **обратная (ОС)** – если её направление *противоположно* направлению главной связи, а её сигнал подаётся с выхода группы элементов основной цепи, охваченных этой связью, на их вход.

**Различают ОС:**

- 1) по знаку

а) **положительную ОС (ПОС)** – проходящий по ней сигнал складывается с основным сигналом на входе группы элементов, охваченных этой связью;

б) **отрицательную ОС (ООС)** – если этот сигнал вычитается из основного сигнала на входе группы элементов, охваченных этой связью;

2) по времени воздействия

а) **жесткая ОС** – если передаваемое этой связью воздействие зависит только от выходной величины (регулируемого параметра) и не зависит от времени;

б) **гибкая ОС** – действует только во время переходного процесса.

3) по степени охвата главной цепи (рис. 1.3):

а) **местная (дополнительная) ОС** – охватывает часть главной цепи;  
б) **главная ОС.**

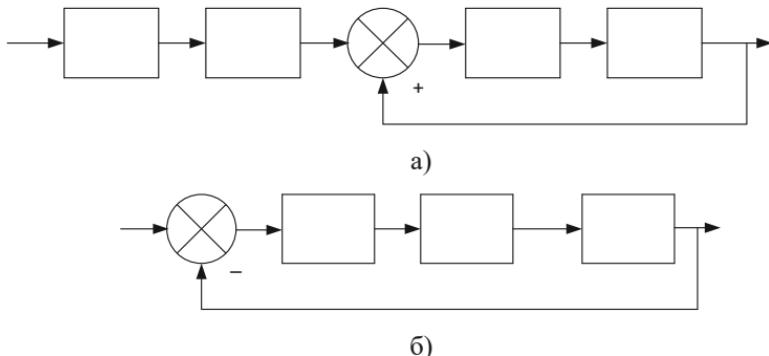


Рис. 1.3. Виды ОС:

а) местная положительная; б) главная отрицательная.

Здесь  $\bigotimes$  – обозначение сумматора.

**Линейной** называется САУ, описываемая линейными дифференциальными уравнениями (ДУ).

Для линейных систем справедлив **принцип суперпозиции**: *реакция линейной САУ на любую комбинацию внешних воздействий равна сумме реакций на каждое из этих воздействий, поданных на систему порознь.*

Принцип суперпозиции лежит в основе общей теории линейных САУ, описываемых линейными ДУ любого порядка. Его применение позволяет выразить реакцию линейной САУ на *любое* произвольное

воздействие через реакцию системы на элементарные **типовыe** воздействия. Для этого произвольный входной сигнал нужно представить в виде алгебраической суммы **типовыx элементарных входных сигналов**:

- **единичная ступенчатая функция**

$$1(t) = \begin{cases} 0, & t < 0, \\ 1, & t \geq 0; \end{cases}$$

- **единичный мгновенный импульс**

$$\delta(t) = \begin{cases} 0, & t \neq 0, \\ \infty, & t = 0, \end{cases}$$

причем функция  $\delta(t)$  – это производная от функции  $1(t)$  и представляет собой узкий импульс, ограничивающий единичную площадь;

- **линейный сигнал**

$$x_{\text{вх}}(t) = at;$$

- **гармонический сигнал**

$$x_{\text{вх}}(t) = X_{\text{max}} \sin(\omega t + \psi).$$

Целью рассмотрения САУ может быть решение одной из двух задач:

1) **анализ САУ** – определение свойств САУ по её известным параметрам;

2) **синтез САУ** – разработка системы, удовлетворяющей известным требованиям и имеющей определенные, заранее известные характеристики.

В самом общем виде **исследование САУ** заключается в следующем:

- 1) разрабатывается математическое описание САУ;
- 2) исследуются её установившиеся режимы;
- 3) осуществляется исследование переходных режимов.

Для математического описания САУ разбивают на звенья не по функциональному признаку, а исходя из удобства получения этого описания. С этой целью разбиение САУ осуществляют на возможно более мелкие простые звенья, но вместе с тем обладающие **однородностью** действия.

**Звеном направленного действия** называется звено, передающее воздействие только в одном направлении – со входа на выход, так что

изменение состояния такого звена не влияет на состояние предшествующего звена, работающего на его вход. В результате такого разбиения математическое описание каждого отдельного звена может быть составлено *без учёта связи его с другими звеньями*. Математическое описание осуществляется *одним из способов*:

- 1) *аналитически* – в виде уравнений, связывающих входные и выходные величины звена;
- 2) *графически* – в виде характеристик, описывающих ту же связь.

Всей САУ соответствует совокупность составленных независимо друг от друга уравнений или характеристик отдельных звеньев, образующих систему уравнений, дополненных уравнениями связи между ними.

В результате разбиения на звенья и математического описания составляется *структурная схема САУ*, состоящая из связанных между собой *типовых звеньев*.

*Изучение динамических свойств типовых звеньев и их типовых соединений и является целью предлагаемого курса.*

#### *Вопросы для самопроверки*

1. Дайте определение общей теории управления.
2. Дайте определение теории автоматического управления.
3. Что такое управление объектом?
4. Приведите примеры объектов управления.
5. Каким может быть управление?
6. Нарисуйте обобщенную структурную схему САУ.
7. Дайте определение регулятору.
8. Дайте определение системе автоматического управления.
9. Что такое чувствительное устройство, вычислительное устройство?
10. Чем отличаются структурные и функциональные схемы?
11. Что такое АЦП, ЦАП?
12. Что такое исполнительное устройство?
13. Дайте определение связи.
14. Перечислите типы связей.
15. Приведите примеры ООС в природных и технических системах.
16. Приведите примеры ПОС в природных и технических системах.
17. Какая САУ является линейной?
18. В чем состоит принцип суперпозиции?
19. Назовите типовые входные сигналы.
20. Что означает анализ САУ, синтез САУ?

## 2. Классификация систем автоматического управления

### Классификация по виду используемой информации

1. *Разомкнутые САУ* – в них выходная величина объекта  $X$  не измеряется, т.е. нет контроля за состоянием объекта. Таким образом, *нет главной ОС*, при наличии которой объект и УУ образуют замкнутый контур.

#### а) *САУ по задающему воздействию*.

В них поступающие извне команды задающего воздействия  $X_3$  приводят к изменению управляющего воздействия  $U$ . А это ведет к соответствующему изменению выходной величины  $X$ . Точность обеспечиваемого при этом соответствия между  $X$  и  $X_3$  целиком определяется постоянством параметров системы. Наличие возмущений здесь никак не контролируется. Поэтому практически такие системы пригодны лишь при достаточно высокой стабильности условий работы САУ и невысоких требованиях к точности.

На рис. 2.1 дана функциональная схема импульсного программного управления шаговым двигателем (ШД).

Когда через обмотку ротора шагового двигателя ОШД проходит импульс тока, ШД поворачивается на определённый угол  $k$ . При прохождении  $n$  одинаковых импульсов осуществляется поворот на угол  $\alpha = k \cdot n$ .

Схема управления состоит из *задатчика выдачи импульсов* З. Имп., который выдаёт на ОШД импульсы в соответствии с заранее разработанной программой. Двигатель перемещает исполнительный механизм ИМ в соответствии с программой.

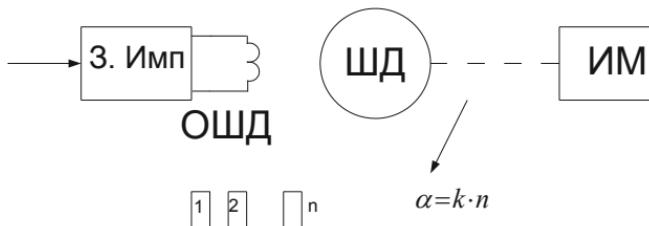


Рис. 2.1. Функциональная схема САУ ШД

Подобные САУ применяются в системах программного управления металлообрабатывающими станками. В этой схеме не контролируется фактический поворот ротора двигателя; предполагается, что

характеристики двигателя и системы генерации импульсов достаточно стабильны, чтобы обеспечить пропорциональность

$$\alpha = k \cdot n.$$

То есть система будет давать сбои при искажении импульсов, когда импульс оказывается пропущенным и, следовательно,  $\alpha \neq k \cdot n$ .

Структурная схема таких САУ представлена на рис. 2.2.



Рис. 2.2. Структурная схема САУ по задающему воздействию

б) *САУ по возмущению, или системы автоматической компенсации.*

Такие САУ применяются, если задача управления сводится к **поддержанию постоянства** регулируемой величины.

Результатом возмущения является изменение регулируемой величины  $X$ . Например, если к шинам, питаемым от генератора постоянного тока ГПТ (рис. 2.3), подключаются дополнительные потребители энергии, то следствием этого будет увеличение тока генератора  $I$ , значит, увеличение падения напряжения в цепи якоря  $I \cdot R_A$  и, значит, падение напряжения на шинах генератора:

$$U_{\downarrow} = E - I_{\uparrow} \cdot R_A.$$

Если известен закон, связывающий изменение нагрузки с регулируемой величиной, то можно построить такой регулятор, который воздействовал бы на САУ таким образом, что регулируемая величина (в нашем случае напряжение на шинах генератора  $U = \text{const}$ ) была неизменной. В нашем примере регулирующим параметром является ЭДС генератора. Допустим, генератор не насыщен, т.е.

$$E = k \cdot \Phi_B,$$

где  $\Phi_B$  – поток, создаваемый обмоткой возбуждения генератора ОВГ. Пренебрежём реакцией якоря (т.е. будем считать, что уменьшение напряжения на зажимах генератора вызывается только активным сопротивлением якоря  $R_A$ ).

Если мы хотим, чтобы при всех изменениях  $I$  (они являются **возмущениями**) напряжение на зажимах  $U$  (т.е. регулируемый параметр) оставалось неизменным и равным  $U_0$ , то нужно компенсировать изменение  $I \cdot R_A$ , стремящееся изменить  $U_0$ .

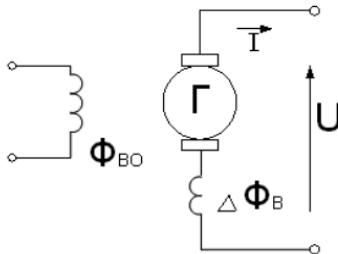


Рис. 2.3. Функциональная схема САУ компенсации влияния нагрузки ГПТ

Это можно осуществить с помощью дополнительной обмотки возбуждения, включенной последовательно в цепь якоря. Эта обмотка создаёт дополнительный магнитный поток  $\Delta\Phi_B$ , компенсирующий падение  $I \cdot R_A$ . На рис. 2.3  $\Phi_{B0}$  – поток, создающий  $E = U_0$  при холостом ходе, т.е. при  $I = 0$ . Функциональной схеме на рис. 2.3 соответствует структура на рис. 2.4.

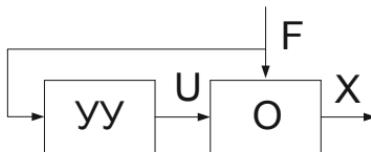


Рис. 2.4. Структурная схема САУ по возмущению

Таким образом, компаундирование (введение дополнительных обмоток возбуждения) электрических машин представляет собой пример САУ по возмущению.

### в) САУ по задающему и возмущающему воздействию

Структура таких систем приведена на рис. 5. Принцип компенсации возмущения позволяет существенно повысить точность управления в разомкнутых САУ. Однако она остается невысокой по следующим причинам:

- невозможно компенсировать все возмущения, действующие на САУ;
- с течением времени параметры О и УУ изменяются.

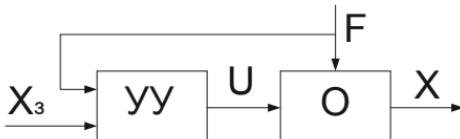


Рис. 2.5. Структурная схема комбинированной САУ

2. **Замкнутые САУ** – САУ с ОС, или САУ по отклонению имеют структурную схему, показанную на рис. 2.6. Исходя из величины  $X_3$ , УУ определяет соответствующее требуемое значение  $X$  и, имея информацию о текущем значении  $X$ , обеспечивает нужное соотношение  $X$  и  $X_3$  путём воздействия на объект  $O$ .

Иными словами, УУ стремится ликвидировать все отклонения  $X$  от его значения, определяемого заданием  $X_3$ , **независимо** от причин, их вызвавших (внешние и внутренние возмущения, изменения параметров системы).

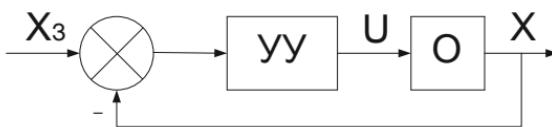


Рис. 2.6. Структурная схема замкнутой САУ

Эти САУ могут обеспечить высокую точность управления и представляют собой основной тип САУ.

В качестве примера рассмотрим САУ скоростью двигателя постоянного тока (ДПТ) (рис. 2.7). Передвигая движок реостата  $P$ , мы изменяем ток возбуждения в обмотке возбуждения генератора (ОВГ), что приводит к изменению ЭДС и, значит, напряжения, подводимого к щёткам ДПТ. На валу двигателя размещен тахогенератор ТГ, развивающий ЭДС, пропорциональную скорости вращения вала. В цепь ТГ введено постоянное задание в виде постоянного напряжения  $U_0$ , включённое встречно с  $U_{\text{ТГ}}$ . В результате получим **ошибку регулирования**

$$\Delta U = U_0 - U_{\text{ТГ}}$$

Подведём её к усилителю  $Y$ , на выходе которого включим двигатель ДП, перемещающий ползунок реостата.

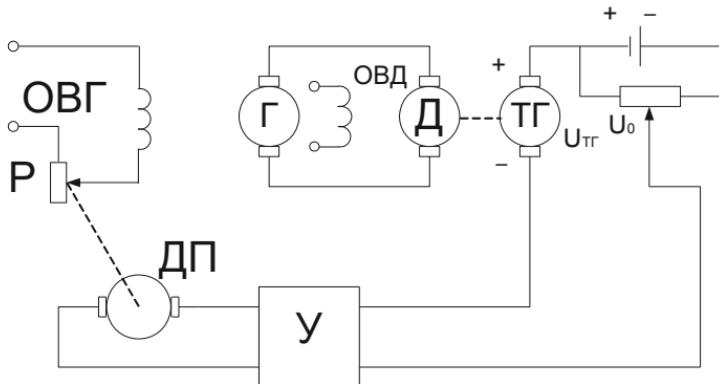


Рис. 2.7. Функциональная схема САУ скоростью ДПТ

Если возмущение приводит к снижению скорости двигателя постоянного тока  $\mathcal{D}$ , то напряжение на зажимах тахогенератора ТГ  $U_{\text{ТГ}}$  уменьшается, ошибка регулирования

$$\Delta U = U_0 - U_{\text{ТГ}}$$

уменьшается, поэтому двигатель ползунка ДП смещает ползунок реостата таким образом, что произойдет увеличение тока в обмотке возбуждения генератора ОВГ, следовательно, вырастет напряжение на зажимах генератора Г. Поэтому возрастет напряжение и на щетках  $\mathcal{D}$ , следовательно, вырастет скорость вращения двигателя  $\mathcal{D}$ .

Таким образом, отклонение от задания ликвидируется. Говорят, что образуется отрицательная обратная связь (ООС) по скорости двигателя.

3. **Комбинированные САУ** – сочетают в себе замкнутую САУ по отклонению и разомкнутую систему управления по возмущению. Добавление к замкнутой системе управления разомкнутой системы компенсации влияния какого-либо (обычно самого действенного) возмущения облегчает задачу замкнутой САУ, что позволяет:

- 1) упростить её, следовательно, увеличить надёжность;
- 2) повысить точность, т.к. наиболее полно учитывается информация и об объекте, и о внешней ситуации.

## **Классификация по закону изменения регулируемой величины**

1) **САУ поддержания постоянства регулируемой величины** – системы автоматического регулирования – САР.

Приведенная САУ скоростью ДПТ является именно такой САУ. Кроме неё, к таким системам можно отнести системы регулирования частоты и напряжения электрического тока на электростанциях, регулирования температуры и давления пара в котельных установках и т.д.

2) **Системы программного регулирования** – в них значение регулируемой величины изменяется по определённой, заранее установленной программе.

Типичным примером является САУ металлообрабатывающих станков с числовым программным управлением (ЧПУ), когда траектория движения режущего инструмента (программа) известна заранее и задаётся в виде программы. Программное управление осуществляется при управлении движением лифтов, прокатных станов, при регулировании температуры в печах для закалки и отжига и т.п.

3) **Следящая система** поддерживает параметры регулирования в соответствии с таким его значением, которое изменяется по заранее неизвестному закону и является величиной, независимой от регулятора.

Примером такой САУ является система, управляющая положением орудийной башни (рис. 2.8.). При изменении положения цели необходимо повернуть задающий штурвал. При этом из-за разницы в положении ползунков *a* и *b* в диагонали моста возникает напряжение, поступающее на усилитель *У*. В обмотке возбуждения двигателя ОВД появляется ток, двигатель *Д* поворачивает редуктор и через него башню до тех пор, пока не сравняется положение стрелок *a* и *b*, скользящие по сопротивлению моста. Тогда напряжения на диагонали моста не будет, следовательно, двигатель *Д* остановится. Таким образом САУ «отследила» поворот задающего штурвала.

Схемы всех трёх рассмотренных выше групп САР в основном одинаковы и отличаются лишь видом задающего элемента ЗЭ.

В САР первого типа ЗЭ напоминает собой своеобразный эталон, с которым сравнивается регулируемая величина *X*. Вырабатываемое в эталоне значение  $X_0$  называется *установкой регулятора*.

Если регулятор предназначен для работы на разных объектах или же по условиям эксплуатации значение  $X_0$  должно в определён-

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)