

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ВОЛЖСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ (ФИЛИАЛ)
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Л.И. Медведева

ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Электронное учебно-методическое пособие



Волжский

2019

УДК 658.52(07)
ББК 32.965я73
М 42

Рецензенты:

канд. тех. наук, начальник Волжского филиала ФБУ «Волгоградский ЦСМ»
Бельчанская Е.Н.,
канд. физ-мат. наук, доцент, филиал г. Волжский МЭИ(ТУ)
Капля Е.В.

Издается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

Медведева, Л.И.

Основы теории управления [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие / Л.И. Медведева ; ВПИ (филиал) ВолгГТУ. – Электронные текстовые данные (1 файл: 1,04 МБ). – Волжский, 2019. – 82с. - Режим доступа: <http://lib.volpi.ru>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-5-9948-3311-7

Учебно-методическое пособие содержит теоретический материал, необходимый для выполнения и защиты лабораторных работ, протоколы лабораторных работ.

Предназначено для студентов, обучающихся дисциплине «Основы теории управления» по направлениям бакалавриата 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника» всех форм обучения.

Ил. 30, табл.3, библиограф.: 5 назв.

ISBN 978-5-9948-3311-7

© Волгоградский
государственный
технический
университет, 2019
© Волжский
политехнический
институт, 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
1. Основные понятия и определения	5
2. Математическое описание линейных элементов АСУ	11
3. Анализ устойчивости и оценка качества линейных АСУ	26
4. Анализ автоматических регуляторов	34
5. Анализ инвариантных систем управления	40
6. Анализ особенностей программного средства для выполнения лабораторных работ	44
Приложение А	46
Список литературы	81

ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплины «Основы теории управления» является ознакомление студентов с основными положениями теории управления, с математическими методами, используемыми в системах управления, включая методы математического описания, методы исследования переходных процессов, методы коррекции и синтеза систем, с теоретическими и практическими вопросами получения информации об объекте управления, с особенностями применения устройств ЭВМ для изучения и обработки исходной информации.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- *знать* основные принципы управления, понятия «объект управления», «цель управления», «процесс управления»; основные элементы системы управления, роль обратной связи в управлении; основные понятия об информации, виды представления информации, свойства информации; принципы и методы построения моделей динамических систем управления; задачи анализа систем управления, критерии устойчивости, формы инвариантности, показатели качества, алгебраические критерии управляемости и наблюдаемости систем управления; задачи, цели, критерии и ограничения синтеза систем управления, основные этапы синтеза систем управления;
- *уметь* применять методы анализа и синтеза систем управления, принципы построения и особенности проектирования цифровых систем управления различных классов; применять принципы выбора методов для конкретного приложения;
- *владеть* направлениями развития теории управления, использования основных положений теории управления при построении автоматических и автоматизированных систем управления техническими объектами и технологическими процессами; направлениями использования микропроцессоров и микро-ЭВМ в системах управления, использования ЭВМ в качестве управляющих устройств, о применении теории управления в областях промышленности [1].

Понятие «Теория управления» аккумулирует входящие в ее название термины:

- *теория* – совокупность знаний, позволяющих при определенных условиях получать достоверный результат;
- *управление* – воздействие, оказываемое на объект, для достижения определенной цели.

Поэтому:

теория управления – совокупность знаний, позволяющих создавать и вводить в действие автоматические системы управления технологическими процессами с заданными характеристиками.

Объект изучения теории управления – автоматическая система управления (АСУ).

Предмет изучения теории управления – процессы, протекающие в АСУ.

Цель изучения теории управления – учет приобретенных знаний в практической деятельности при проектировании, производстве, монтаже, наладке и эксплуатации АСУ [2].

ГЛАВА 1. Основные понятия и определения

Алгоритм функционирования устройства (системы) – совокупность предписаний, ведущих к правильному выполнению технического процесса в каком-либо устройстве или в совокупности устройств (системе).

Например, *электрическая система* – совокупность устройств, обеспечивающих единство процессов генерирования, преобразования, передачи, распределения и потребления электрической энергии при обеспечении ряда требований к режимным параметрам (частоте, напряжению, мощности и т.д.). Электрическая система спроектирована таким образом, чтобы при нормальных условиях эксплуатации эти требования выполнялись, то есть *правильно* выполнялся технический процесс. В данном случае *алгоритм функционирования* электрической системы реализован в конструкции входящих в ее состав устройств (генераторов, трансформаторов, линий электропередачи и т.д.) и в определенной схеме их соединения.

Однако надлежащему функционированию устройства (системы) могут мешать внешние обстоятельства (воздействия). Например, для электрической системы такими воздействиями могут быть: изменение нагрузки потребителей электрической энергии, изменение конфигурации электрической сети в результате переключений, короткие замыкания, обрывы проводов и т.д. Поэтому на устройство (систему) приходится оказывать специальные воздействия, направленные на компенсацию нежелательных последствий внешних воздействий и выполнение алгоритма функционирования. В связи с этим вводятся следующие понятия.

Объект управления (ОУ) – устройство (система), осуществляющее технический процесс и нуждающееся в специально организованных воздействиях извне для осуществления его алгоритма функционирования.

Объектами управления являются, например, как отдельные устройства электрической системы (турбогенераторы, силовые преобразователи электрической энергии, нагрузки), так и электрическая система в целом.

Алгоритм управления – совокупность предписаний, определяющих характер воздействий извне на объект управления и обеспечивающих его алгоритм функционирования.

Примерами алгоритмов управления являются алгоритмы изменения возбуждения синхронного генератора и расхода пара в их турбинах с целью компенсации нежелательного влияния изменения нагрузки потребителей на

уровни напряжения в узловых точках электрической системы и частоту этого напряжения.

Устройство управления (УУ) – устройство, осуществляющее в соответствии с алгоритмом управления воздействие на объект управления.

Примерами устройств управления являются автоматический регулятор возбуждения (АРВ) и автоматический регулятор частоты вращения (АРЧВ) синхронного генератора.

Автоматическая система управления (АСУ) – совокупность взаимодействующих между собой объекта управления и устройства управления (рис. 1).

Таковой, например, является автоматическая система возбуждения синхронного генератора, содержащая взаимодействующие между собой АРВ и собственно синхронный генератор.

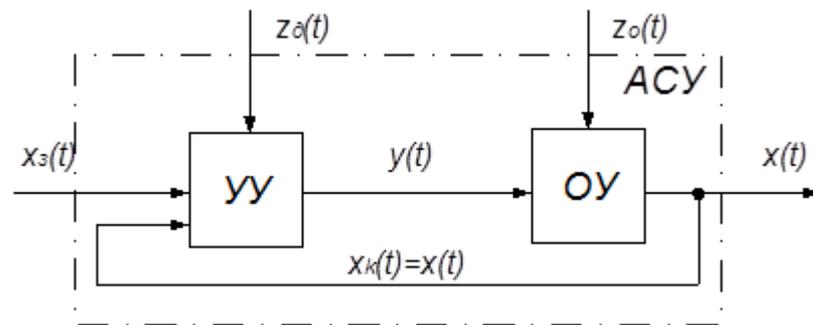


Рисунок 1. Обобщенная структурная схема АСУ.

В ней:

$x(t)$ – *управляемая величина* – физическая величина, характеризующая состояние объекта. Часто объект управления имеет несколько управляемых величин $x_1(t)$, $x_2(t)$... $x_n(t)$, тогда говорят об n -мерном векторе состояния объекта $x(t)$ с перечисленными выше компонентами. Объект управления в этом случае называют многомерным. Примерами управляемых величин в электрической системе являются: ток, напряжение, мощность, частота вращения и т.д.

$z_0(t)$, $z_d(t)$ – соответственно *основное* (действующее на объект управления) и *дополнительное* (действующее на устройство управления) *возмущающие воздействия*. Примерами основного возмущающего воздействия $z_0(t)$ являются изменение нагрузки синхронного генератора, температуры охлаждающей его среды и т.п., а дополнительного возмущающего воздействия $z_d(t)$ – изменение условий охлаждения УУ, нестабильность напряжения источников питания УУ и т.п.

$y(t)$ – *управляющее воздействие*. Управляющее воздействие вырабатывается в управляющем устройстве в соответствии с алгоритмом управления в зависимости от истинного и предписанного значений управляемой величины.

$x_k(t) = x(t)$ – контрольное воздействие – информация об истинном значении управляемой величины.

$x_3(t)$ – задающее воздействие – предписанное (желаемое) значение управляемой величины.

Алгоритм управления (алгоритм функционирования управляющего устройства) – зависимость управляющего воздействия от задающего воздействия, управляемой величины и дополнительного возмущающего воздействия. Для одномерной АСУ алгоритм управления можно записать следующим образом:

$$y(t) = A_y[x_3(t), x(t), z_o(t)]. \quad (1)$$

Алгоритм функционирования объекта управления – зависимость управляемой величины от управляющего и основного возмущающего воздействий. Для одномерной АСУ алгоритм функционирования объекта можно записать следующим образом:

$$x(t) = A_o[y(t), z_o(t)]. \quad (2)$$

Алгоритм функционирования объекта и алгоритм управления в совокупности образуют алгоритм функционирования АСУ.

Воздействия $z(t)$ и $x_3(t)$ являются *внешними* для рассматриваемой системы, а воздействия $x_k(t)$ и $y(t)$ – *внутренними*. Передача внешних и внутренних воздействий происходит через элементы АСУ, которые в совокупности образуют несколько цепей воздействий. На рис.1 можно указать, например, цепи воздействий от величины $x_3(t)$ к величине $y(t)$ и далее к $x(t)$, от $z_o(t)$ к $x(t)$.

Классификация АСУ может быть осуществлена по различным принципам и признакам, характеризующим назначение и конструкцию систем, вид применяемой энергии, используемые алгоритмы управления и функционирования и т.д.

Рассмотрим первоначально классификацию АСУ по признакам, которые характеризуют алгоритм функционирования и алгоритм управления АСУ [Синегин].

В зависимости от конфигурации цепи воздействий различают три вида АСУ:

- с разомкнутой цепью воздействий (разомкнутая система);
- с замкнутой цепью воздействий (замкнутая система);
- с комбинированной цепью воздействий (комбинированная система).

Разомкнутая АСУ – система, в которой не осуществляется контроль управляемой величины, т.е. входными воздействиями ее управляющего устройства являются только внешние (задающее и возмущающее) воздействия.

Разомкнутые АСУ можно разделить в свою очередь на два типа:

- осуществляющие управление в соответствии с изменением только задающего воздействия (рис. 2, а);
- осуществляющие управление в соответствии с изменением и задающего и возмущающего воздействий (рис. 2, б).

Алгоритм управления разомкнутой системы первого типа имеет вид:

$$y(t) = A_y[x_3(t)]. \quad (3)$$

Чаще всего оператор A_y устанавливает пропорциональную связь между задающим воздействием $x_3(t)$ и управляющим воздействием $y(t)$, а сама система в этом случае осуществляет программное управление.

Системы первого типа работают с достаточной эффективностью лишь при условии, если влияние возмущений на управляемую величину невелико и все элементы разомкнутой цепи обладают достаточно стабильными характеристиками.

В системах управления по возмущению (рис. 2, б) управляющее воздействие зависит от возмущающего и задающего воздействий:

$$y(t) = A_y[x_3(t), z(t)]. \quad (4)$$

В большинстве случаев разомкнутые системы управления по возмущению выполняют функции стабилизации управляемой величины.

Преимущество разомкнутых систем управления по возмущению – их быстроедействие: они компенсируют влияние возмущения еще до того, как оно проявится на выходе объекта. Но применимы эти системы лишь в том случае, если на управляемую величину действуют одно или два возмущения и есть возможность измерения этих возмущений. Например, сравнительно легко можно измерять температуру, расход воды, ток нагрузки генератора. Поэтому если эти величины действуют на объект как возмущения, то обычно стремятся стабилизировать их при помощи дополнительной системы или ввести в основную систему управления данным объектом сигнал, пропорциональный такому воздействию.

Замкнутая АСУ (АСУ с обратной связью) – система, в которой входными воздействиями ее управляющего устройства являются как внешнее (задающее), так и внутреннее (контрольное) воздействия.

Управляющее воздействие в замкнутой системе (рис. 2, в) формируется в большинстве случаев в зависимости от величины и знака отклонения истинного значения управляемой величины от ее заданного значения:

$$y(t) = A_y[\varepsilon(t)], \quad (5)$$

где $\varepsilon(t) = x_3(t) - x(t)$ – сигнал ошибки (сигнал рассогласования).

Замкнутую систему называют часто *системой управления по отклонению*.

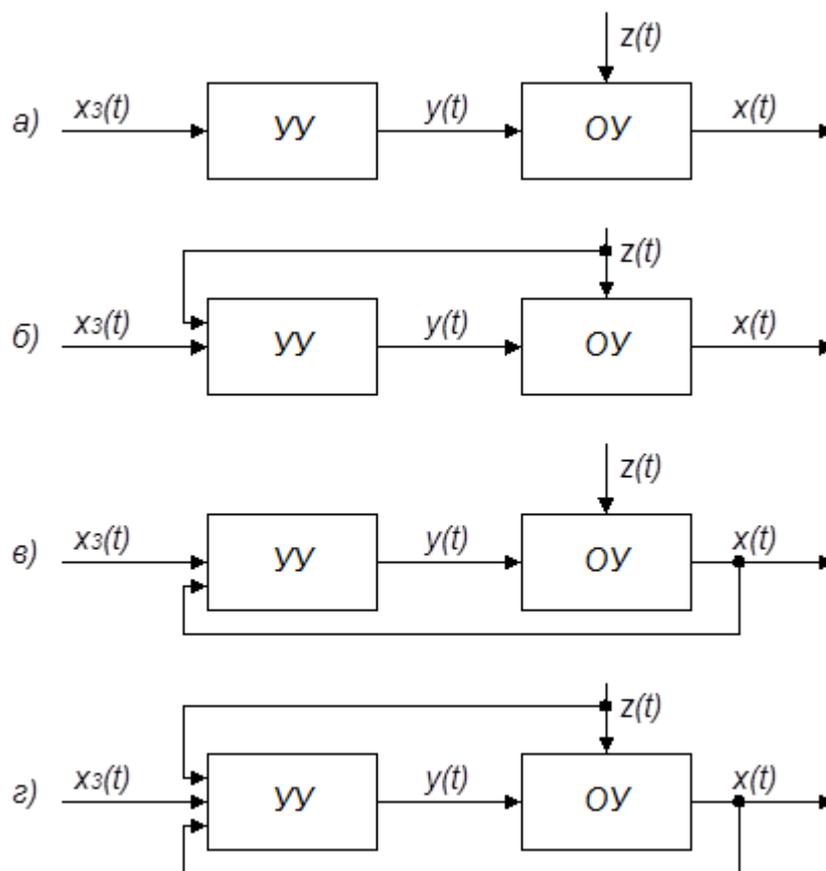


Рисунок 2. Функциональные схемы АСУ с разомкнутой (а, б), замкнутой (в) и с комбинированной (г) цепями воздействий.

В замкнутой системе контролируется непосредственно управляемая величина и тем самым при выработке управляющего воздействия учитывается действие всех возмущений, влияющих на управляемую величину. В этом заключается преимущество замкнутых систем. Но из-за наличия замкнутой цепи воздействия в этих системах могут возникать колебания, которые в некоторых случаях делают систему неработоспособной. Кроме того, сам принцип действия замкнутых систем (принцип управления по отклонению) допускает нежелательные изменения управляемой величины: вначале возмущение должно проявиться на выходе, система “почувствует” отклонение и лишь потом выработает управляющее воздействие, направленное на устранение этого отклонения. Такая “медлительность” снижает эффективность управления. Несмотря на наличие определенных недостатков, этот принцип управления широко применяется при создании АСУ.

Основное внимание в настоящем пособии будет уделено именно замкнутым системам управления.

Комбинированная АСУ – система, в которой входными воздействиями ее управляющего устройства являются как внешние (задающее и возмущающее), так и внутреннее (контрольное) воздействия.

В комбинированных системах (рис. 2, г) имеется две цепи воздействий – по заданию и по возмущению, и управляющее воздействие формируется согласно оператору:

$$y(t) = A_3[\varepsilon(t)] + A_6[z(t)]. \quad (6)$$

Эффективность работы комбинированной АСУ всегда больше, чем у порознь функционирующих замкнутой или разомкнутой систем.

В зависимости от вида сигналов, действующих в системах, АСУ разделяют на:

- непрерывные;
- дискретные.

Непрерывная АСУ – АСУ, в которой действуют непрерывные (аналоговые), определенные в каждый момент времени сигналы.

Дискретная АСУ – АСУ, в которой действует хотя бы один дискретный, определенный только в некоторые моменты времени сигнал.

К дискретным АСУ относятся, например, АСУ, имеющие в своем составе цифровые вычислительные устройства: микропроцессоры, контроллеры, электронные вычислительные машины.

По степени зависимости управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия АСУ делят на:

- статические;
- астатические.

Статическая АСУ – АСУ, в которой имеется зависимость управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия.

Астатическая АСУ – АСУ, в которой отсутствует зависимость управляемой величины в установившемся режиме от величины возмущающего воздействия.

По виду дифференциальных уравнений, описывающих элементы АСУ, они делятся на:

- *линейные*;
- *нелинейные*.

Линейные АСУ – АСУ, все элементы которых описываются линейными дифференциальными и/или алгебраическими уравнениями.

Нелинейные АСУ – АСУ, хотя бы один элемент которой описывается нелинейными дифференциальными и/или алгебраическими уравнениями.

ГЛАВА 2. Математическое описание линейных элементов АСУ

При взаимодействии частей АСУ между собой, а также и при процессе функционирования самого объекта управления осуществляется преобразование энергии одного вида в энергию другого вида. Это обусловлено различной физической природой элементов, входящих в состав АСУ. Так одна и та же система может включать в себя, например, механические, электрические и гидравлические элементы. Но процессы преобразования и перераспределения энергии в АСУ, в отличие от многих других физических систем, *строго ориентированы*, т. е. энергия и воздействия передаются только в определенном направлении.

Направленность передачи воздействий в АСУ обеспечивается благодаря наличию у одного или нескольких конструктивных элементов системы так называемого *детектирующего свойства*. Это свойство заключается в том, что рассматриваемый элемент не оказывает обратного действия на предыдущий элемент, а его выходная величина не влияет на свою входную. Например, электрический четырехполюсник обладает *однаправленностью* передачи воздействий, если он не нагружает предшествующий четырехполюсник, т. е. если выходное сопротивление предшествующего элемента существенно меньше входного сопротивления рассматриваемого четырехполюсника.

Обычно свойством *однаправленности* обладают те элементы АСУ, которые передают информационные воздействия. К таким элементам относятся в первую очередь измерители и преобразователи сигналов. Конструктивные части системы, через которые передаются энергетические воздействия, этим свойством, как правило, не обладают.

Только вследствие наличия элементов *направленного* действия в АСУ создается замкнутый контур передачи воздействий, при помощи которого и осуществляется целенаправленный процесс управления. Без таких элементов АСУ были бы неработоспособны или малоэффективны.

Большое разнообразие конструкций и условий работы АСУ определяет многообразие воздействий и сигналов. Анализ конкретных АСУ существенно упрощается, если пользоваться разработанной в ТАУ *типизацией* воздействий и сигналов. Рассмотрим основные типы сигналов и воздействий.

В зависимости от характера изменения во времени различают сигналы:

- регулярный (детерминированный);
- нерегулярный.

Регулярный (детерминированный) сигнал – сигнал, который изменяется по определенному закону и может быть описан конкретной математической функцией времени. Пример регулярного сигнала приведен на рис. 3, а.

Нерегулярный сигнал – сигнал, который изменяется во времени случайным образом и не может быть представлен конкретной математической функцией. Характер изменения случайного сигнала во времени показан на рис. 3, б.

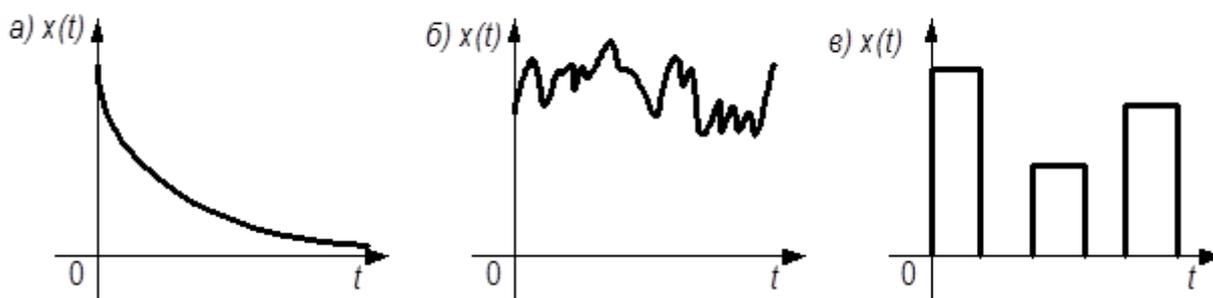


Рисунок 3. Виды сигналов.

В зависимости от определенности во времени различают сигналы:

- непрерывный (аналоговый);
- дискретный.

Непрерывный (аналоговый) сигнал – сигнал, который определен в любой момент времени. Примерами такого сигнала являются сигналы, приведенные на рис. 3, а, б.

Дискретный сигнал – сигнал, который определен лишь в некоторые моменты времени. Пример дискретного сигнала приведен на рис. 3, в.

При исследовании АСУ и их элементов используют ряд *стандартных сигналов*, называемых *типовыми воздействиями*. Эти воздействия описываются простыми математическими функциями и легко воспроизводятся при исследовании АСУ. Использование типовых воздействий позволяет унифицировать анализ различных систем и облегчает сравнение их передаточных свойств. Наибольшее применение в теории управления находят следующие типовые воздействия:

- ступенчатое;
- импульсное;
- гармоническое;
- линейное.

Ступенчатое воздействие – воздействие, которое мгновенно возрастает от нуля до некоторого значения и далее остается постоянным (рис. 4, а). Ступенчатому воздействию соответствует функция:

$$x(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ a_0 & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (7)$$

При анализе и расчете систем удобно использовать ступенчатое воздействие, у которого величина $a_0 = 1$. Его называют *единичным*

ступенчатым воздействием и обозначают $\mathbf{1}(t)$. Математическое выражение, описывающее единичное ступенчатое воздействие, имеет вид:

$$\mathbf{1}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ 1 & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (8)$$

Любое неединичное ступенчатое воздействие можно обозначить $a_0\mathbf{1}(t)$. Единичное ступенчатое воздействие, возникающее в момент времени $t = t_1$, обозначают $\mathbf{1}(t - t_1)$. Ступенчатое воздействие чаще всего используют при исследованиях систем стабилизации параметров, так как эти воздействия наиболее близки к реальным входным (задающим и возмущающим) воздействиям систем стабилизации.

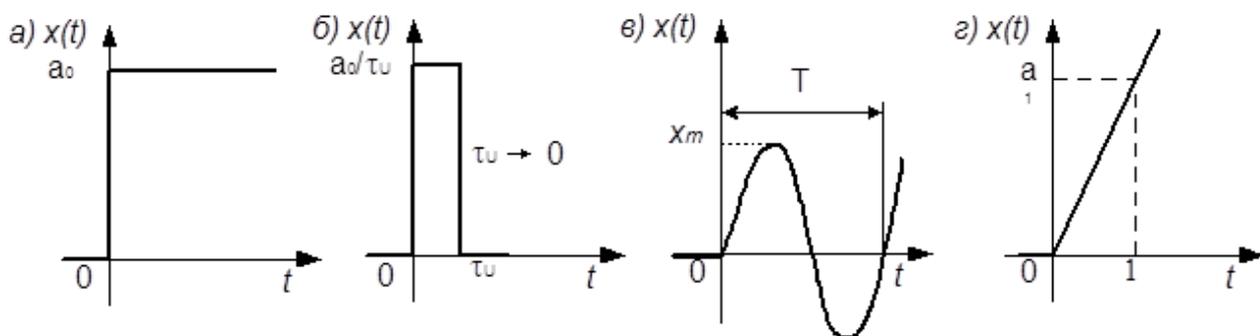


Рисунок 4. Виды типовых воздействий.

Импульсное воздействие – одиночный импульс прямоугольной формы (рис. 4, б), имеющий достаточно большую высоту и малую длительность (по сравнению с инерционностью испытываемой системы) с площадью a_0 . При математическом анализе АСУ используют *единичное импульсное воздействие*, описываемое так называемой *дельта-функцией*:

$$\delta(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0; \\ \infty & \text{при } t > 0, \end{cases} \quad (9)$$

причем $\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1$.

Последние два выражения позволяют рассматривать дельта-функцию, как импульс, имеющий бесконечно большую высоту, бесконечно малую длительность и единичную площадь. Дельта-функцию можно определить также как производную единичного ступенчатого воздействия: $\delta(t) = \frac{d\mathbf{1}(t)}{dt}$.

Неединичное импульсное ступенчатое воздействие с площадью a_0 обозначается $x(t) = a_0 \delta(t)$.

Гармоническое воздействие – сигнал синусоидальной формы, описываемый функцией (рис. 4, в):

$$x(t) = x_m \sin \omega t, \quad (-\infty < t < \infty), \quad (10)$$

где x_m – амплитуда сигнала; $\omega = 2\pi / T$ – круговая частота; T – период сигнала.

Гармонический сигнал, начинающий действовать в момент времени $t = 0$, описывают при помощи единичной ступенчатой функции: $x(t) = \mathbf{1}(t) x_m \sin \omega t$, $(0 \leq t < \infty)$.

Линейное воздействие – воздействие, описываемое функцией (рис. 4, г) $x(t) = \mathbf{1}(t) a_1 t$, $(0 \leq t < \infty)$. Коэффициент a_1 характеризует скорость нарастания воздействия $x(t)$.

По характеру изменения выходной величины во времени различают следующие режимы элемента АСУ:

- статический;
- динамический.

Статический режим – состояние элемента АСУ, при котором выходная величина не изменяется во времени, т. е. $y(t) = const$. Очевидно, что статический режим (или состояние равновесия) может иметь место лишь тогда, когда входные воздействия постоянны во времени. Связь между входными и выходными величинами в статическом режиме описывают алгебраическими уравнениями.

Динамический режим – состояние элемента АСУ, при котором входная величина непрерывно изменяется во времени, т. е. $y(t) = var$. Динамический режим имеет место, когда в элементе после приложения входного воздействия происходят процессы установления заданного состояния или заданного изменения выходной величины. Эти процессы описываются в общем случае дифференциальными уравнениями.

Динамические режимы в свою очередь разделяются на:

- неустановившийся (переходный);
- установившийся (квазиустановившийся).

Неустановившийся (переходный) режим – режим, существующий от момента начала изменения входного воздействия до момента, когда выходная величина начинает изменяться по закону этого воздействия.

Установившийся режим – режим, наступающий после того, когда выходная величина начинает изменяться по такому же закону, что и входное воздействие, т. е. наступающий после окончания переходного процесса. В установившемся режиме элемент совершает вынужденное движение.

Очевидно, что статический режим является частным случаем установившегося (вынужденного) режима при $x(t) = const$.

Понятия «*переходный режим*» и «*установившийся режим*» иллюстрируются графиками изменения выходной величины $y(t)$ при двух типовых входных воздействиях $x(t)$ (рис. 5). Граница между *переходным* и *установившимся* режимами показана вертикальной пунктирной линией.

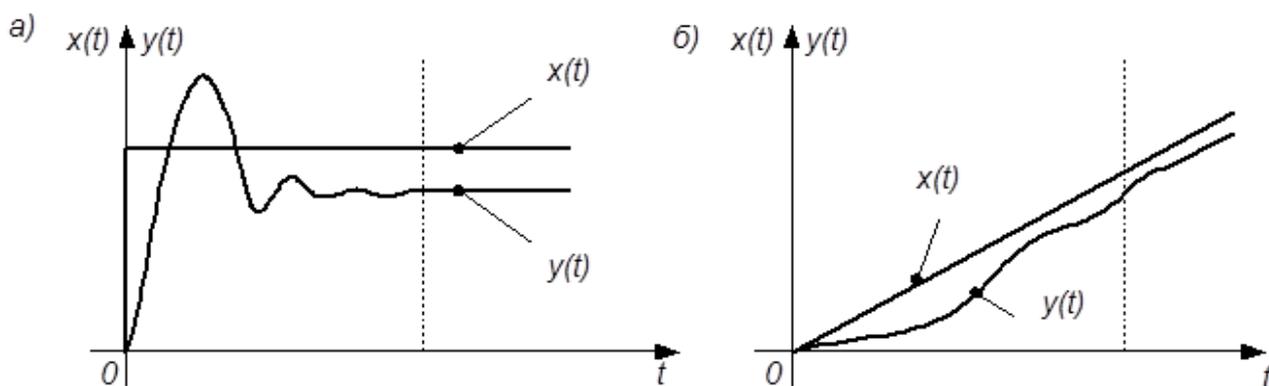


Рисунок 5. Переходные и установившиеся режимы при типовых воздействиях.

Передачные свойства элементов АСУ в динамическом режиме описывают с помощью *динамических характеристик*. Различают следующие формы динамических характеристик:

- обыкновенное дифференциальное уравнение;
- временные характеристики;
- передаточная функция;
- частотные характеристики.

Обыкновенное дифференциальное уравнение является наиболее общей и полной формой описания передаточных свойств элементов АСУ.

Для элемента имеющего один входной сигнал $x(t)$ и один выходной $y(t)$ обыкновенное дифференциальное уравнение в общем случае имеет вид:

$$\Phi[y(t), y'(t), \dots, y^{(n)}(t); x(t), \dots, x^{(m)}(t), t] = 0, \quad (11)$$

где t – независимая переменная (обычно время).

Для реальных систем $m \leq n$. Это уравнение динамики (движения) элемента. Движения в широком смысле слова, когда под движением понимается любое изменение сигналов.

В функцию Φ (*дифференциальное уравнение*) входят также величины, называемые *параметрами*. Они связывают между собой аргументы $(y(t), y'(t), \dots, y^{(n)}(t); x(t), \dots, x^{(m)}(t), t)$ и характеризуют свойства элемента с

количественной стороны. Например, *параметрами* являются масса тела, активное сопротивление, индуктивность и емкость проводника и т. д.

Большинство реальных элементов описываются нелинейными дифференциальными уравнениями, что значительно усложняет последующий анализ АСУ. Поэтому стремятся перейти от нелинейных к линейным уравнениям вида:

$$a_0 \frac{d^n y(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y(t) = b_0 \frac{d^m x(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} x(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_m x(t). \quad (12)$$

Для всех реальных элементов выполняется условие $m \leq n$. Коэффициенты $a_0, a_1 \dots a_n$ и $b_0, b_1 \dots b_m$ в уравнении (12) называются *параметрами*. Иногда параметры изменяются во времени, тогда элемент называют *нестационарным* или *с переменными параметрами*.

Дифференциальное уравнение не дает наглядного представления о динамических свойствах элемента, но такое представление дает функция $y(t)$, т. е. решение этого уравнения. Одно и то же дифференциальное уравнение может иметь множество решений, зависящих от начальных условий и характера входного воздействия $x(t)$, что неудобно при сопоставлении динамических свойств различных элементов. Поэтому было решено характеризовать эти свойства элемента только *одним* решением дифференциального уравнения, полученным при *нулевых* начальных условиях и одним из *типовых* воздействий: единичном ступенчатом, дельта-функции, гармоническом, линейном. Наиболее наглядное представление о динамических свойствах элемента дает его *переходная функция* $h(t)$.

Переходная функция $h(t)$ элемента – изменение во времени выходной величины $y(t)$ элемента при единичном ступенчатом воздействии и нулевых начальных условиях. Переходная функция может быть задана:

- в виде графика;
- в аналитическом виде.

Характеристическое уравнение – алгебраическое уравнение, степень и коэффициенты которого совпадают с порядком и коэффициентами левой части линейного дифференциального уравнения вида (12):

$$a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (13)$$

Наиболее распространенным методом описания и анализа АСУ является операционный метод (метод операционного исчисления), в основе которого лежит прямое интегральное преобразование Лапласа для непрерывных функций $F(p) = Z \{ f(t) \} = \int_0^{\infty} f(t) e^{-pt} dt$. Это преобразование устанавливает соответствие между функцией действительной переменной t и функцией комплексной переменной $p = \alpha + j\beta$. Функцию $f(t)$, входящую в

интеграл Лапласа, называют *оригиналом*, а результат интегрирования – функцию $F(p)$ – *изображением* функции $f(t)$ по Лапласу. Преобразование выполнимо лишь для функций, которые равны нулю при $t < 0$. Формально это условие в теории управления обеспечивается умножением функции $f(t)$ на единичную ступенчатую функцию $\mathbf{1}(t)$ или выбором начала отсчета времени с момента, до которого $f(t) = 0$.

Операционный метод в теории управления получил широкое распространение, так как с его помощью определяют так называемую *передаточную функцию*, которая является самой компактной формой описания динамических свойств элементов и систем. Применяя прямое преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению (12), получим алгебраическое уравнение:

$$D(p)Y(p) = K(p)X(p), \quad (14)$$

где $D(p) = a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n$ - *собственный оператор*;
 $K(p) = b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m$ - *входной оператор*.

Передаточная функция – отношение изображения выходной величины к изображению входной величины при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (15)$$

Тогда с учетом уравнения (14) выражение для передаточной функции принимает вид:

$$W(p) = \frac{K(p)}{D(p)} = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n}. \quad (16)$$

Значение переменной p , при которой передаточная функция $W(p)$ обращается в бесконечность, называется *полюсом передаточной функции*. Очевидно, что полюсами являются корни собственного оператора $D(p)$. Значение переменной p , при которой передаточная функция $W(p)$ обращается в нуль, называется *нулем передаточной функции*. Очевидно, что нулями являются корни входного оператора $K(p)$. Если коэффициент $a_0 \neq 0$, то передаточная функция не имеет нулевого полюса ($p = 0$), характеризуемый ей элемент называют *астатическим* и передаточная функция этого элемента при $p = 0$ ($t = \infty$) равна *передаточному коэффициенту* $k = W(0) = \frac{b_m}{a_n}$.

Частотные характеристики описывают передаточные свойства элементов и АСУ в режиме установившихся гармонических колебаний, вызванных внешним гармоническим воздействием. Они находят применение в теории управления, так как реальные возмущения, а следовательно, и реакции на них элемента или АСУ могут быть представлены как сумма гармонических сигналов.

Рассмотрим *сущность* и *разновидности* частотных характеристик. Пусть на вход линейного элемента (рис. 6, а) в момент времени $t = 0$ подано гармоническое воздействие с частотой ω $x(t) = x_m \sin \omega t$.

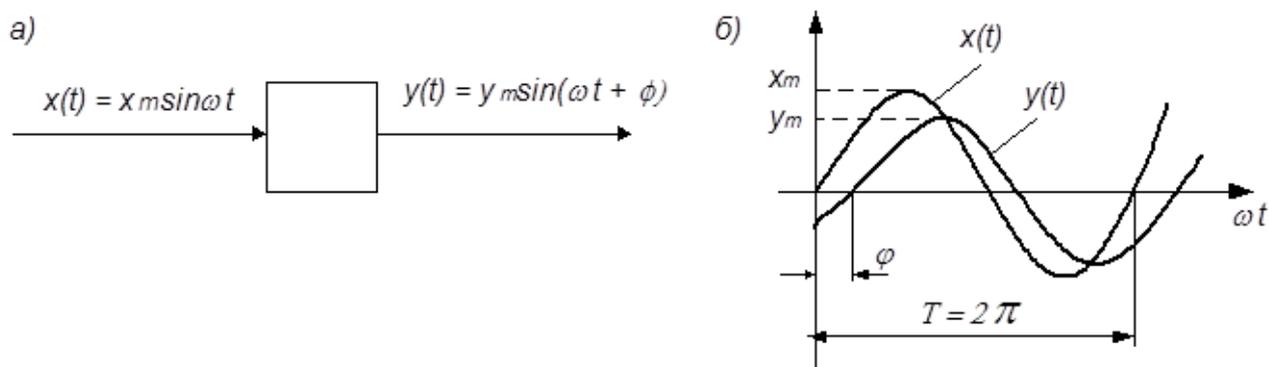


Рисунок 6. Схема и кривые, поясняющие сущность частотных характеристик.

По завершении переходного процесса установится режим вынужденных колебаний и выходная величина $y(t)$ будет изменяться по тому же закону, что и входная $x(t)$, но в общем случае с другой амплитудой y_m и с фазовым сдвигом φ по оси времени относительно входного сигнала (рис. 6, б): $y(t) = y_m \sin(\omega t + \varphi)$.

Проведя аналогичный опыт, но при другой частоте ω , можно увидеть, что амплитуда y_m и фазовый сдвиг φ изменились, т. е. они зависят от частоты. Можно убедиться также, что для другого элемента зависимости параметров y_m и φ от частоты ω иные. Поэтому такие зависимости могут служить характеристиками динамических свойств элементов.

В теории управления наиболее часто используют следующие частотные характеристики:

- амплитудная частотная характеристика (АЧХ);
- фазовая частотная характеристика (ФЧХ);
- амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ).

Амплитудная частотная характеристика (АЧХ) – зависимость отношения амплитуд выходного и входного сигналов от частоты:

$$A(\omega) = \frac{y_m}{x_m}. \quad (17)$$

АЧХ показывает, как элемент пропускает сигналы различной частоты. Пример АЧХ приведен на рис. 7, а.

Фазовая частотная характеристика ФЧХ – зависимость фазового сдвига между входным и выходным сигналами от частоты. ФЧХ показывает, какое отставание или опережение выходного сигнала по фазе создает элемент при различных частотах. Пример ФЧХ приведен на рис. 7, б.

Амплитудную и фазовую характеристики можно объединить в одну общую – *амплитудно-фазовую частотную характеристику (АФЧХ)*. АФЧХ представляет собой функцию комплексного переменного $j\omega$. $W(j\omega) = A(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$ (показательная форма), где $A(\omega)$ – модуль функции; $\varphi(\omega)$ – аргумент функции.

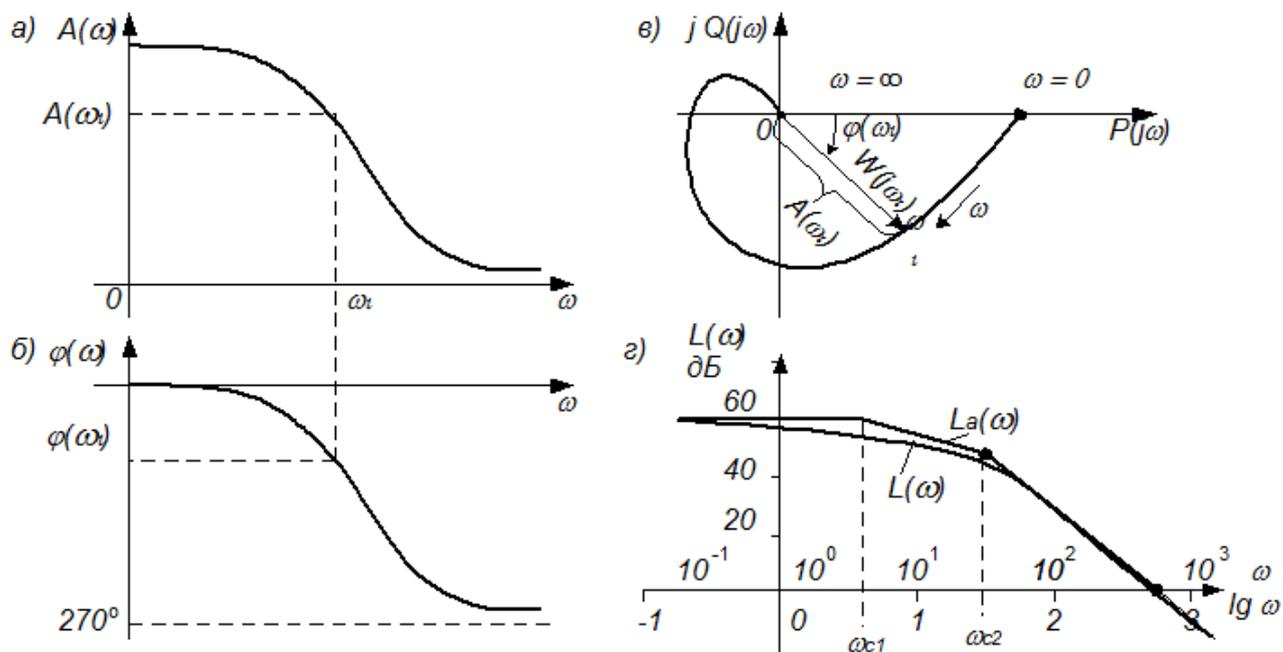


Рисунок 7. Частотные характеристики:
 а – амплитудная; б – фазовая; в – амплитудно-фазовая; г – логарифмическая.

Каждому фиксированному значению частоты ω_i соответствует комплексное число $W(j\omega_i)$, которое на комплексной плоскости можно изобразить вектором, имеющим длину $A(\omega_i)$ и угол поворота $\varphi(\omega_i)$ (рис. 7, в). Отрицательные значения $\varphi(\omega)$, соответствующие отставанию выходного сигнала от входного, принято отсчитывать по часовой стрелке от положительного направления действительной оси. При изменении частоты от нуля до бесконечности вектор $W(j\omega)$ поворачивается вокруг начала координат, при этом одновременно изменяется длина вектора. Кривая, которую при этом опишет конец вектора, и есть АФЧХ. Каждой точке характеристики соответствует определенное значение частоты. Проекция вектора $W(j\omega)$ на действительную и мнимую оси называют соответственно *действительной* и *мнимой частотными характеристиками* и обозначают $P(\omega)$, $Q(\omega)$. Это позволяет записать АФЧХ в *алгебраической* форме: $W(j\omega) = P(\omega) + j Q(\omega)$. АФЧХ, как и любую комплексную величину, можно также представить в тригонометрической форме: $W(j\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega) + j A(\omega) \sin \varphi(\omega)$.

Аналитическое выражение для АФЧХ конкретного элемента можно получить из его передаточной функции путем подстановки $p = j\omega$:

$$W(j\omega) = W(p) \Big|_{p=j\omega}. \quad (18)$$

Связь между различными частотными характеристиками следующая:

$$A(\omega) = |W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}, \quad (19)$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(j\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (20)$$

Функциональные элементы, используемые в АСУ, могут иметь самые различные конструктивное выполнение и принципы действия. Однако общность математических выражений, связывающих входные и выходные величины различных функциональных элементов, позволяет выделить ограниченное число так называемых *типовых алгоритмических звеньев*. Каждому типовому алгоритмическому звену соответствует определенное математическое соотношение между входной и выходной величинами. Если это соотношение является *элементарным* (например, дифференцирование, умножение на постоянный коэффициент), то и звено называется *элементарным*.

Алгоритмические звенья, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями первого и второго порядка, получили название *типовых динамических звеньев*. Типовые динамические звенья являются основными составными частями алгоритмических схем непрерывных АСУ, поэтому знание их характеристик существенно облегчает анализ таких систем.

Классификацию типовых динамических звеньев удобно осуществить, рассматривая различные частные формы дифференциального уравнения

$$a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) = b_0 \frac{dx(t)}{dt} + b_1 x(t). \quad (21)$$

Значения коэффициентов уравнения (21) и названия для наиболее часто применяемых звеньев приведены в табл. 1.

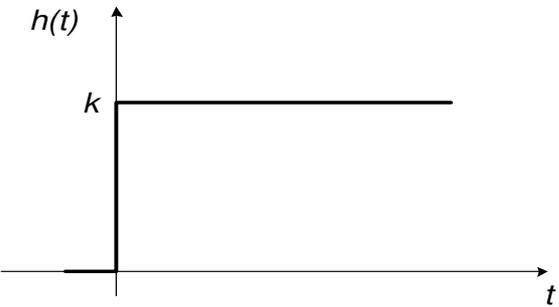
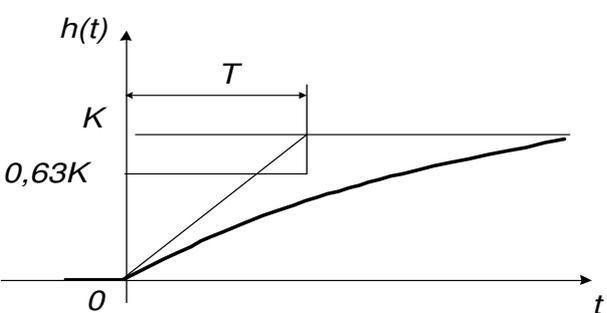
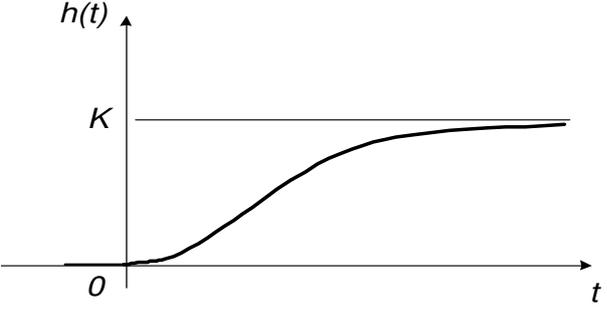
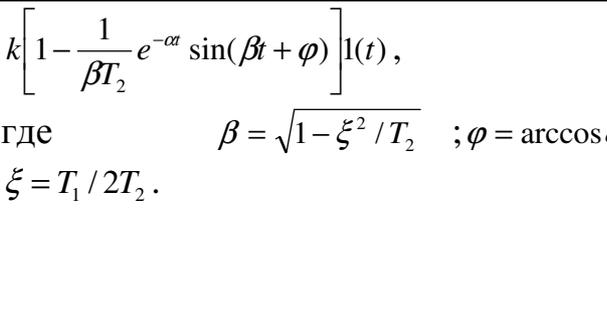
Таблица 1

Значения коэффициентов уравнения (21)

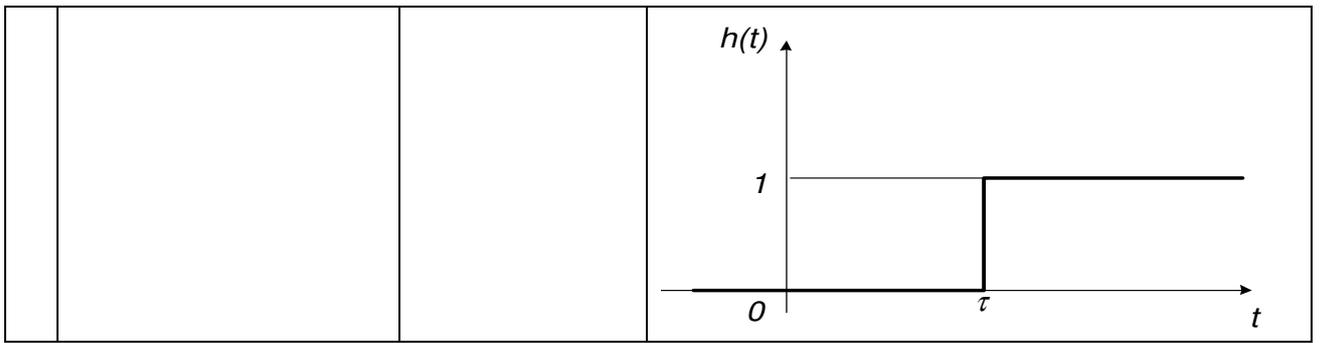
№ n/n	Наименование звена	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	Примечание
1	Безинерционное (пропорциональное)	0	0	1	0	k	
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое)	0	T	1	0	k	
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое)	T_2^2	T_1	1	0	k	$T_1 \geq 2T_2$
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное)	T_2^2	T_1	1	0	k	$T_1 < 2T_2$
5	Идеальное интегрирующее	0	1	0	0	k	
6	Идеальное дифференцирующее	0	0	1	k	0	
7	Реальное дифференцирующее	0	T	1	k	0	

Передаточные и переходные функции для наиболее часто применяемых звеньев приведены в табл. 2.

Передаточные и переходные функции типовых динамических звеньев

№	Наименование звена и описывающее его уравнение	Передаточная функция $W(p)$	Переходная функция $h(t)$
1	Безинерционное (пропорциональное) $y(t) = kx(t)$	k	$k1(t)$ 
2	Инерционное 1-го порядка (апериодическое) $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$	$\frac{k}{Tp + 1}$	$k(1 - e^{-t/T})1(t)$ 
3	Инерционное 2-го порядка (апериодическое) $T_2^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ $T_1 \geq 2T_2$	$\frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$ $T_1 \geq 2T_2$	$k(1 - \frac{T_3}{T_3 - T_4} e^{-t/T_3} + \frac{T_4}{T_3 - T_4} e^{-t/T_4})1(t)$, где $T_3 + T_4 = T_1$; $T_3 T_4 = T_2^2$. 
4	Инерционное 2-го порядка (колебательное) $T_2^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = kx(t)$ $T_1 < 2T_2$	$\frac{k}{T_2^2 p^2 + T_1 p + 1}$ $T_1 < 2T_2$	$k \left[1 - \frac{1}{\beta T_2} e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi) \right] 1(t)$, где $\beta = \sqrt{1 - \xi^2} / T_2$; $\varphi = \arccos \xi$; $\xi = T_1 / 2T_2$. 

5	Идеальное интегрирующее $\frac{dy(t)}{dt} = kx(t)$	$\frac{k}{p}$	$kt1(t)$
6	Идеальное дифференцирующее $y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$	kp	$k\delta(t)$
7	Реальное дифференцирующее $T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = k \frac{dx(t)}{dt}$	$\frac{kp}{Tp+1}$	$\frac{k}{T} e^{-t/T}$
8	Звено запаздывания $y(t) = x(t - \tau)$	$e^{-p\tau}$	$1(t - \tau)$



Для анализа АСУ используются их алгоритмические схемы. Для упрощения (свертывания) сложных алгоритмических схем применяют правила их преобразования. Три главных правила относятся к трем типовым соединениям элементов:

- последовательному;
- параллельному;
- встречно-параллельному (охват обратной связью).

Если эти соединения состоят из элементов направленного действия (с детектирующим свойством), то каждое такое соединение может быть заменено одним элементом, статические и динамические характеристики которого эквивалентны свойствам соединения. Рассмотрим эти типовые соединения звеньев при известности их передаточных функций.

Последовательное соединение звеньев.

Найдем передаточную функцию $W(p)$ звена (рис. 8, б), эквивалентного последовательному соединению звеньев (рис. 8, а).

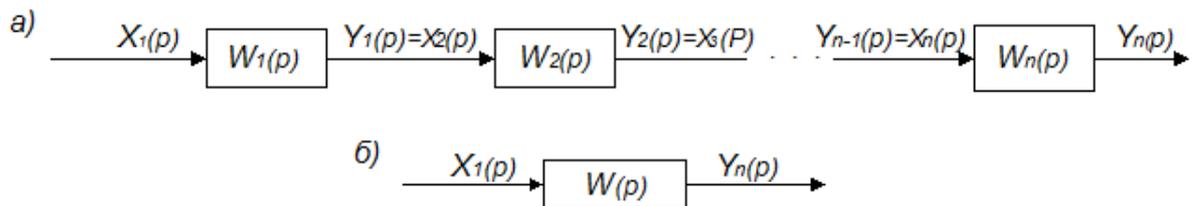


Рисунок 8. Алгоритмические схемы последовательного соединения звеньев (а) и эквивалентного ему звена (б).

Искомая передаточная функция эквивалентного звена

$$\begin{aligned}
 W(p) &= \frac{Y_n(p)}{X_1(p)} = \frac{Y_n(p)}{X_n(p)} \cdot \frac{X_n(p)}{X_{n-1}(p)} \cdot \dots \cdot \frac{X_2(p)}{X_1(p)} = \frac{Y_n(p)}{X_n(p)} \cdot \frac{Y_{n-1}(p)}{X_{n-1}(p)} \cdot \dots \cdot \frac{Y_1(p)}{X_1(p)} = \\
 &= W_n(p) \cdot W_{n-1}(p) \cdot \dots \cdot W_1(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p).
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Параллельное соединение звеньев.

Найдем передаточную функцию $W(p)$ звена (рис. 9, б), эквивалентного параллельному соединению звеньев (рис. 9, а).

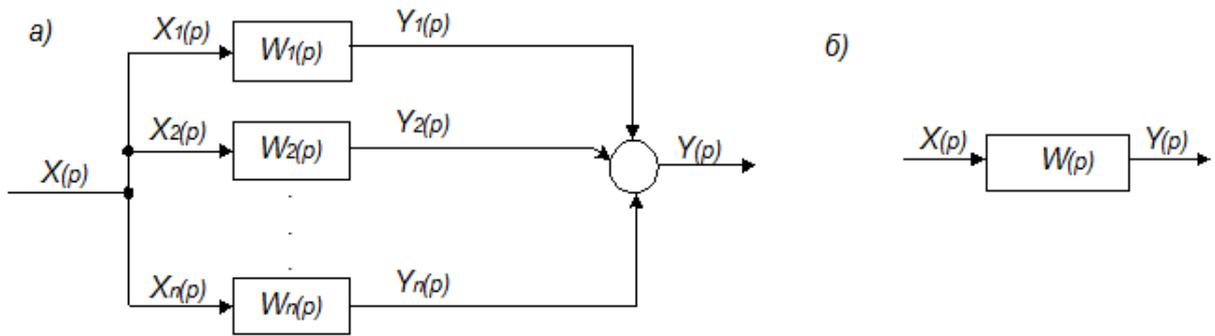


Рисунок 9. Алгоритмические схемы параллельного соединения звеньев (а) и эквивалентного ему звена (б).

Искомая передаточная функция эквивалентного звена:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i(p)}{X(p)} = \sum_{i=1}^n \frac{Y_i(p)}{X_i(p)} = \sum_{i=1}^n W_i(p). \quad (23)$$

Встречно-параллельное соединение звеньев.

Найдем передаточную функцию $W(p)$ звена (рис. 10, б), эквивалентного встречно-параллельному соединению звеньев (рис. 10, а).

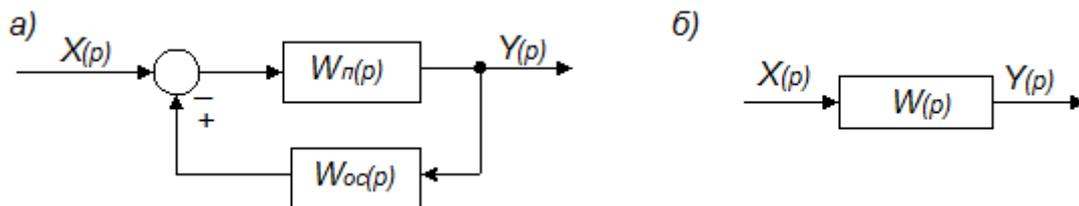


Рисунок 10. Алгоритмические схемы встречно-параллельного соединения звеньев (а) и эквивалентного ему звена (б).

Передаточная функция соединения:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (24)$$

Но при этом:

$$Y(p) = W_n(p)[X(p) \mp W_{oc}(p)Y(p)]. \quad (25)$$

Здесь $W_n(p)$ и $W_{oc}(p)$ – передаточные функции соответственно прямой цепи и цепи обратной связи встречно-параллельного соединения звеньев. После деления обеих частей равенства (25) на $X(p)$ получаем:

$$\frac{Y(p)}{X(p)} = W_n(p) \left[1 \mp W_{oc}(p) \frac{Y(p)}{X(p)} \right]. \quad (26)$$

Учитывая соотношение (24) в равенстве (26), последнее приводим к виду:

$$W(p) = W_{\Pi}(p)[1 \mp W_{OCc}(p)W(p)]. \quad (27)$$

Решая уравнение (27) находим искомую передаточную функцию эквивалентного звена:

$$W(p) = \frac{W_{\Pi}(p)}{1 \pm W_{\Pi}(p)W_{OC}(p)}. \quad (28)$$

При отрицательной обратной связи передаточная функция эквивалентного звена:

$$W(p) = \frac{W_{\Pi}(p)}{1 + W_{\Pi}(p)W_{OC}(p)}. \quad (29)$$

При положительной обратной связи передаточная функция эквивалентного звена:

$$W(p) = \frac{W_{\Pi}(p)}{1 - W_{\Pi}(p)W_{OC}(p)}. \quad (30)$$

С помощью рассмотренных правил удастся преобразовать (упростить) к простейшему виду (рис. 10, б) любую алгоритмическую схему, не содержащую *перекрестных связей* между звеньями. Если же схема многоконтурная и содержит перекрестные связи, то эти правила можно применять лишь после устранения этих перекрестных связей. [2]

Для устранения перекрестных связей следует использовать ряд вспомогательных правил преобразований алгоритмических схем, которые приведены в табл. 3.

Таблица 3

Вспомогательные правила преобразования алгоритмических схем

№	Операция	Исходная схема	Преобразованная схема
1	Перестановка узлов разветвления		
2	Перестановка сумматоров		

3	Перенос узла разветвления через звено вперед		
4	Перенос узла разветвления через звено назад		
5	Перенос сумматора через звено вперед		
6	Перенос сумматора через звено назад		

ГЛАВА 3. Анализ устойчивости и оценка качества линейных АСУ

Одной из важнейших характеристик АСУ является ее устойчивость.

Устойчивость АСУ – свойство системы возвращаться в состояние равновесия после прекращения изменения воздействия, выведшего систему из этого состояния.

Неустойчивая АСУ не возвращается в состояние равновесия, а непрерывно удаляется от него

От устойчивости АСУ зависит ее работоспособность. Система, не обладающая устойчивостью, вообще не способна выполнять функции управления и имеет нулевую или даже отрицательную эффективность. Неустойчивая система может привести управляемый объект в аварийное

состояние. Поэтому проблема устойчивости систем является одной из *центральных* в теории автоматического управления.

Проявлением, по которому можно судить об устойчивости или неустойчивости системы, является характер изменения ее сигналов во времени, например, управляемой величины $x(t)$. Если управляемая величина $x(t)$ после прекращения изменения, например, задающего воздействия $x_3(t)$, становится с течением времени постоянной (рис. 11, а), то система ведет себя *устойчиво*. Если же управляемая величина $x(t)$ возрастает, то система ведет себя *неустойчиво*.

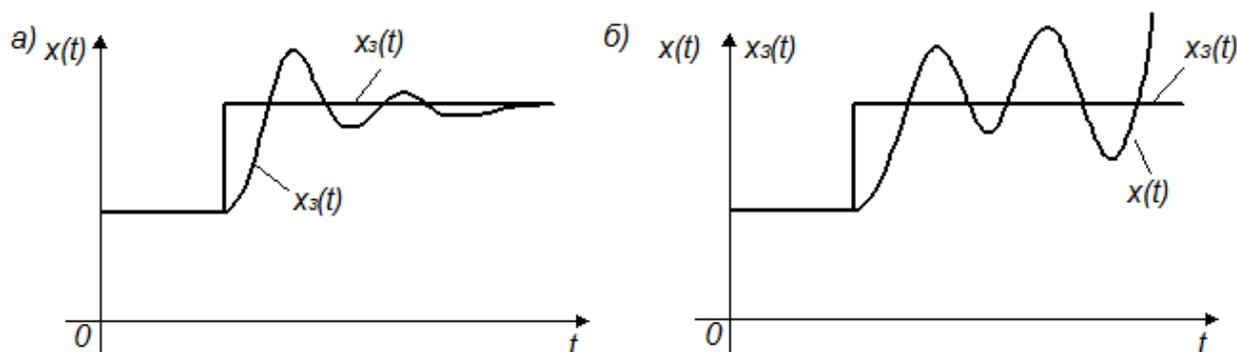


Рисунок 11. Графики изменения сигналов АСУ во времени
а – устойчивая АСУ; б – неустойчивая АСУ.

Согласно данному выше физическому определению устойчивость определяется характером движения системы, когда воздействия, выведшие ее из состояния равновесия, прекратили действовать или изменяться во времени. Такое движение системы называют *свободным*. Оно происходит за счет внутренней энергии самой системы и зависит только от ее свойств (параметров). Свободное движение линейной или линеаризованной АСУ описывается однородным дифференциальным уравнением:

$$a_0 \frac{d^n x(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} x(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_n x(t) = 0, \quad (31)$$

где $x(t)$ – свободная составляющая выходной (управляемой) величины системы.

Вынужденная составляющая выходной величины, зависящая от вида внешнего воздействия и соответственно от правой части уравнения (12) на устойчивость системы не влияет. С математической точки зрения:

- *система устойчива*, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени стремится к нулю;
- *система неустойчива*, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени неограниченно возрастает;
- *система находится на границе устойчивости*, если свободная составляющая $x(t)$ переходного процесса с течением времени не стремится ни к нулю, ни к бесконечности.

Решение уравнения (31) равно сумме:

$$x(t) = \sum_{k=1}^n C_k \exp(p_k t), \quad (32)$$

где C_k – постоянные, зависящие от начальных условий;

p_k – корни характеристического уравнения $a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n = 0$.

Корни характеристического уравнения могут быть действительными ($p_k = \alpha_k$), мнимыми ($p_k = j\beta_k$) и комплексными ($p_k = \alpha_k \pm j\beta_k$). При этом комплексные корни всегда попарно сопряжены между собой: если есть корень с положительной мнимой частью, то обязательно существует корень с такой же по модулю, но отрицательной мнимой частью.

Переходная составляющая (32) при времени $t \rightarrow \infty$ стремится к нулю лишь в том случае, если каждое слагаемое вида $C_k \exp(p_k t) \rightarrow 0$. Характер этой функции времени зависит от вида корня p_k . На рис. 12 изображены возможные случаи расположения корней p_k на комплексной плоскости и соответствующие им функции $x_k(t)$, которые показаны внутри окружностей.

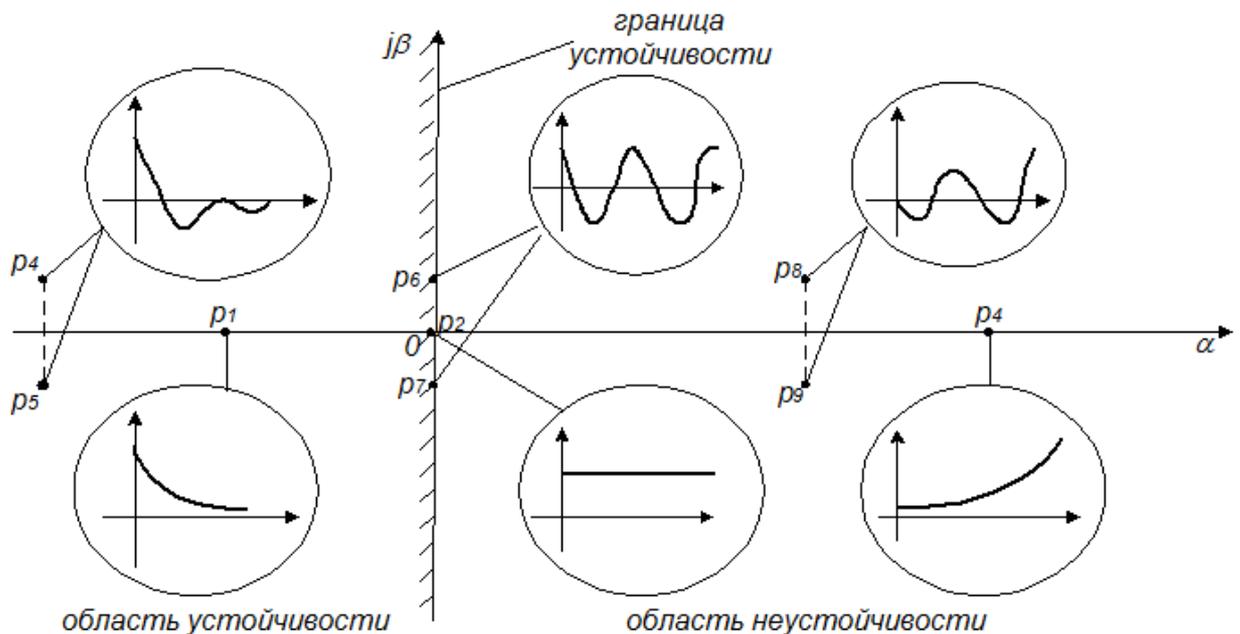


Рисунок 12. Влияние корней характеристического уравнения АСУ на составляющие ее свободного движения.

Анализ рис. 12 позволяет сформулировать *общее математическое условие устойчивости*: для устойчивости линейной АСУ необходимо и достаточно, чтобы действительные части всех корней характеристического уравнения системы были отрицательными (или чтобы все корни характеристического уравнения системы располагались в левой части комплексной плоскости). Устойчивость системы зависит только от вида корней характеристического уравнения и не зависит от характера внешних

воздействий на систему, т. е. устойчивость есть внутреннее свойство системы, присущее ей вне зависимости от внешних условий. Если хотя бы один корень имеет положительную действительную часть (располагается в правой части комплексной плоскости), то система будет неустойчивой. Мнимая ось $j\beta$ является границей устойчивости в плоскости корней. Если характеристическое уравнение имеет пару чисто мнимых корней ($p_k = +j\beta_k$, $p_{k+1} = -j\beta_k$), а все остальные корни находятся в левой части комплексной плоскости, то в системе устанавливаются незатухающие гармонические колебания с круговой частотой $\omega = |\beta_k|$. В этом случае говорят, что система находится на *колебательной границе устойчивости*. Если характеристическое уравнение имеет нулевой корень ($\beta = 0$), то система находится на *апериодической границе устойчивости*. Если таких корней два, то система неустойчива.

Как было показано выше, для суждения об устойчивости линейной АСУ достаточно определить лишь знаки действительных частей корней характеристического уравнения.

В теории управления разработан ряд правил, с помощью которых можно судить о знаках действительных частей корней, не решая характеристическое уравнение и не находя числовые значения самих корней. Эти правила получили название *критериев устойчивости*.

Различают *алгебраические* и *частотные* критерии устойчивости.

Алгебраические критерии устанавливают необходимые и достаточные условия отрицательности вещественных частей корней в форме ограничений, накладываемых на определенные комбинации коэффициентов характеристического уравнения системы.

Частотные критерии определяют связь между устойчивостью системы и формой ее частотных характеристик.

Наибольшее распространение в инженерной практике нашли *алгебраические критерии Гурвица и Рауса*. Рассмотрим один из них – *критерий Гурвица*.

Критерий был сформулирован и доказан в 1895 г. немецким математиком А. Гурвицем, который разработал свой критерий, решая чисто математическую задачу – задачу исследования устойчивости линейного дифференциального уравнения. Гурвиц обратился к этой задаче по просьбе словацкого ученого А. Стодолы, занимавшегося вопросами регулирования турбин. Применительно к задачам теории управления критерий Гурвица можно сформулировать так: *автоматическая система управления, описываемая характеристическим уравнением $a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n = 0$, устойчива, если при $a_0 > 0$ положительны все определители $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ вида*

$$\Delta_j = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & a_{2i-1} \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & a_{2i-2} \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & a_{2i-3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & a_{i-2} & a_i \end{vmatrix}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (33)$$

Если хотя бы один из определителей (33), называемых определителями Гурвица, отрицателен, то система неустойчива.

Определители Гурвица составляют следующим образом: на главной диагонали записывают все коэффициенты характеристического уравнения от a_1 до a_i (в порядке возрастания индекса). Затем в каждом столбце выше диагональных коэффициентов записывают коэффициенты с последовательно возрастающими индексами, а ниже – с последовательно убывающими индексами; на место с коэффициентами с индексами большими n или меньшими нуля проставляют нули. При этом каждый i -й определитель получается размером $i \times i$. Так как последний столбец определителя Δ_n содержит всегда только один элемент a_n , отличный от нуля, то согласно известному свойству определителей $\Delta_n = a_n \Delta_{n-1}$.

Качество АСУ – совокупность свойств, обеспечивающих эффективное функционирование системы в целом.

В свою очередь, свойства из этой совокупности, выраженные в количественной форме, называют *показателями качества АСУ*.

Так АСУ можно характеризовать такими показателями качества, как вес системы, ее габариты, стоимость, надежность, долговечность и т. п. Эти показатели характеризуют качество АСУ в *широком* смысле.

В теории управления же показатели качества рассматривают, как правило, в более *узком* смысле: рассматривают только *статические и динамические свойства системы*, характеризующие *точность* поддержания управляемой величины $x(t)$ на заданном уровне $x_3(t)$ соответственно в установившихся и переходных режимах, т.е. характеризующие *эффективность процесса управления*. Для такого более узкого понимания качества АСУ применяют термин «качество управления АСУ». Иными словами:

качество управления АСУ – совокупность свойств АСУ, характеризующих точность поддержания управляемой величины на заданном уровне в установившихся и переходных режимах.

В свою очередь, свойства из этой совокупности, выраженные в количественной форме, называют *показателями качества управления АСУ*.

Точность АСУ в переходном режиме оценивают при помощи *прямых* и *косвенных* показателей качества.

Прямые показатели качества определяют по графику переходного процесса, возникающего в системе при ступенчатом внешнем воздействии.

Косвенные показатели качества определяют по распределению корней характеристического уравнения или по частотным характеристикам системы.

В настоящее время разработаны и получили широкое распространение мощные средства компьютерного моделирования АСУ, позволяющие точно и быстро вычислять переходный процесс, т. е. оценивать точность системы через прямые показатели качества.

Перерегулирование σ – величина, равная отношению первого максимального отклонения x_m управляемой величины $x(t)$ от ее установившегося значения $x(\infty)$ к этому установившемуся значению:

$$\sigma = \frac{x_m - x(\infty)}{x(\infty)} \cdot 100 = \frac{A_1}{x(\infty)} \cdot 100, \% \quad (34)$$

Качество управления считается удовлетворительным, если перерегулирование не превышает 30...40%.

Степень затухания:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1} = 1 - \frac{A_3}{A_1} \quad (35)$$

Интенсивность затухания колебаний в системе считается удовлетворительной, если $\psi = 0,75...0,95$.

Длительность переходного процесса (время регулирования) t_n – интервал времени от момента приложения ступенчатого воздействия до момента, после которого отклонения управляемой величины $x(t)$ от ее нового установившегося значения $x(\infty)$ становятся меньше некоторого заданного числа δ_n , т.е. до момента, после которого выполняется условие $|x(t) - x(\infty)| \leq \delta_n$. В промышленной автоматике величину δ_n обычно принимают равной 5% от установившегося значения $x(\infty)$ [$\delta_n = 0,05 x(\infty)$].

Колебательность N – число переходов управляемой величины $x(t)$ через ее установившееся значение $x(\infty)$ за время переходного процесса t_n .

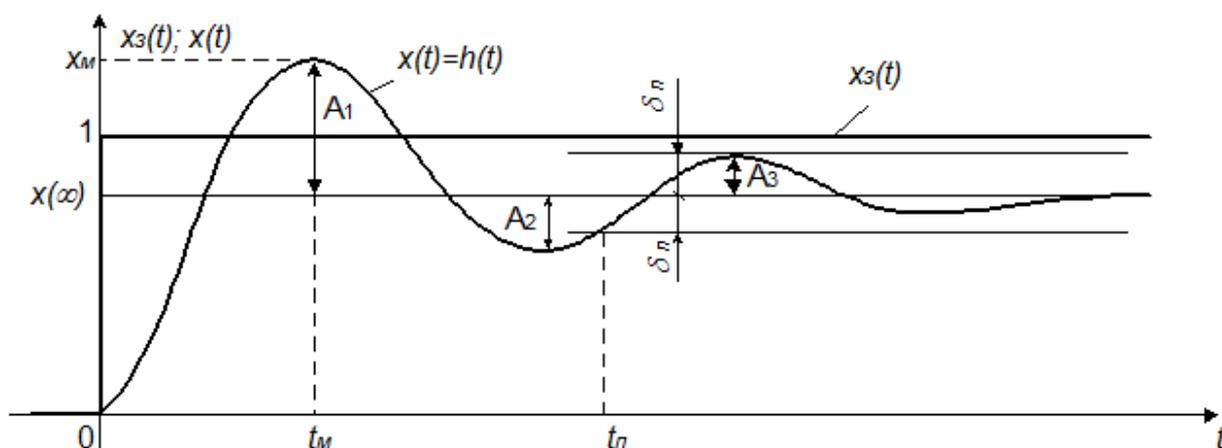


Рисунок 13. Прямые показатели качества процесса управления (регулирования).

Три главных показателя качества – перерегулирование σ , первое максимальное отклонение x_m и длительность переходного процесса t_n – тесно связаны между собой. Они зависят от всех параметров системы, но наиболее сильно – от передаточного коэффициента k разомкнутой системы. Причем, с увеличением этого коэффициента максимальное отклонение по каналу возмущения всегда уменьшается (рис. 14, а), максимальное отклонение по каналу задающего воздействия всегда увеличивается (рис. 14, б), а перерегулирование и длительность переходного процесса, как правило, увеличиваются. Отыскание оптимального компромисса между этими двумя противоречивыми тенденциями является одной из основных задач синтеза АСУ.

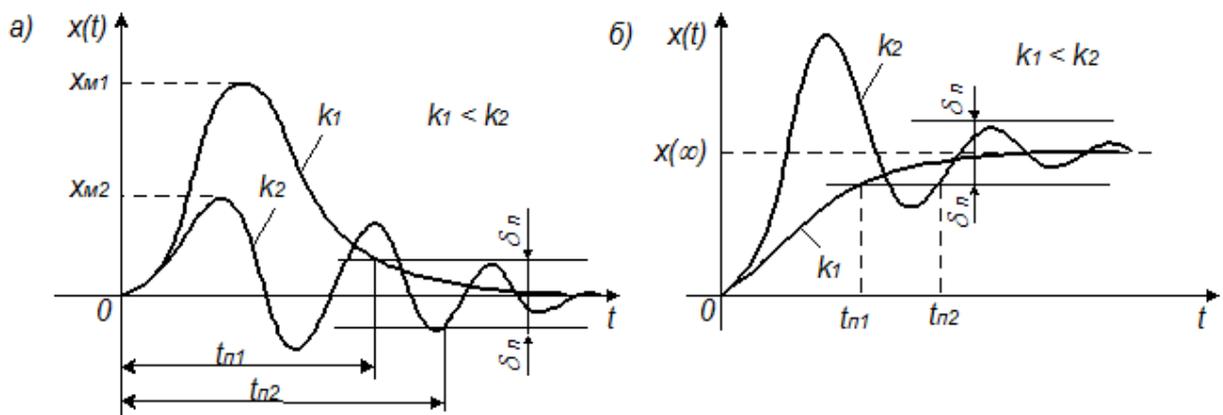


Рисунок 14. Влияние передаточного коэффициента разомкнутой системы на показатели переходного процесса а – по возмущающему воздействию; б – по задающему воздействию.

Каждый из рассмотренных выше прямых показателей качества характеризует лишь *одно* какое-либо свойство АСУ, лишь *один* признак переходного процесса. Причем, все показатели связаны с настроечными параметрами регулятора сложными зависимостями, имеющими, как правило, противоречивый характер: изменение параметра приводит к *улучшению* одних показателей качества и *ухудшению* других. Это обстоятельство существенно затрудняет выбор параметров регулятора. Поэтому в инженерной практике широко используются *интегральные показатели (оценки) качества*.

Интегральная оценка качества – определенный интеграл по времени (в пределах от 0 до ∞) от некоторой функции управляемой величины $x(t)$, а чаще сигнала ошибки $\varepsilon(t)$:

$$Q = \int_0^{\infty} f_0[x(t), t] dt. \quad (36)$$

Подынтегральная функция f_0 выбирается таким образом, чтобы интеграл (36) лучше характеризовал качество системы и проще выражался через

коэффициенты передаточной функции замкнутой системы. Чтобы интеграл был сходящимся, в функцию f_0 вводят не абсолютные значения $x(t)$ или $\varepsilon(t)$, а их отклонения от конечных, установившихся значений.

Простейшей интегральной оценкой является *линейная интегральная оценка*:

$$Q_L = \int_0^{\infty} [x(\infty) - x(t)] dt, \quad (37)$$

которая равна площади, заключенной между прямой $x(\infty)$ и кривой переходного процесса $x(t)$ (рис. 15, а). Интегральная оценка (36) учитывает как величину динамических отклонений, так и длительность их существования. Поэтому *чем меньше оценка, тем лучше качество процесса управления*.

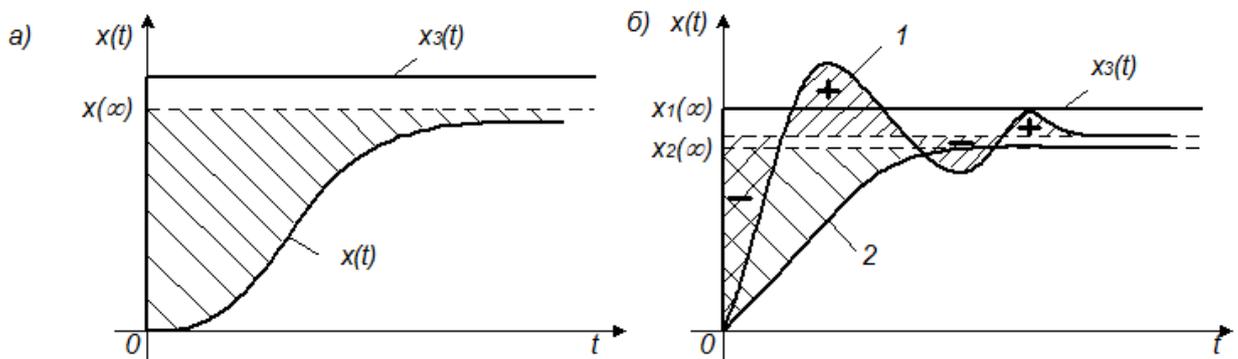


Рисунок 15. Интегральные оценки качества.

Недостатком линейной интегральной оценки Q_L является то, что ее можно применять лишь для заведомо неколебательных, апериодических переходных процессов. Интеграл (37), вычисленный для знакопеременной кривой 1, (рис. 15, б) будет существенно меньше интеграла, вычисленного для апериодической кривой 2 (хотя качество переходного процесса 2 явно лучше).

В связи с этим для колебательных переходных процессов применяют такие интегральные оценки, знакопеременность подынтегральной функции которых тем или иным способом устранена. Такой оценкой является, например, *модульная интегральная оценка*:

$$Q_M = \int_0^{\infty} |x(\infty) - x(t)| dt \quad (38)$$

Все рассмотренные интегральные показатели используют не только для оценки качества, но и для *определения оптимальных значений настроечных параметров АСУ*. Оптимальными считают такие значения, которые соответствуют минимуму интегрального показателя $Q \rightarrow \min$ [2].

ГЛАВА 4. Анализ автоматических регуляторов

Процесс проектирования АСУ складывается в основном из двух этапов. Условно их можно характеризовать следующим образом. На первом этапе формируется так называемая желаемая характеристика АСУ того или иного объекта регулирования. Исходя из технологического регламента, учитываются: точность регулирования Δ , время регулирования t_p , величина перерегулирования, число колебаний, степень затухания ψ и т. д. В качестве желаемой может служить любая динамическая характеристика, в частности переходная. Очевидно, что переходная характеристика формируется независимо от того, как будет выглядеть реальная система, какова будет ее структура, каковы настройки параметров, из каких элементов она будет состоять. Поэтому первый этап проектирования является этапом внешнего проектирования. На этом этапе главную роль играют постановщики задач.

Второй этап проектирования связан, главным образом, с выбором типа регулятора и его настроечных параметров. Предполагается, что статические и динамические характеристики регулируемого объекта в том или ином виде известны или подлежат предварительному определению. При выборе типа регулятора и его настроечных параметров учитывают и наличие возможных помех, случайных воздействий на АСУ как со стороны внешней окружающей среды, так и со стороны элементов самой системы: регулятора, объекта регулирования и исполнительных механизмов. Этот этап можно назвать этапом внутреннего проектирования. Он выполняется специалистами по автоматизации.

В системах автоматического регулирования поддержание заданного значения регулируемого параметра или изменение его по определенному закону обеспечивается аппаратными средствами, имеющими общее название – автоматические регуляторы.

По виду регулируемого параметра автоматические регуляторы подразделяются на регуляторы температуры, давления, влажности, разряднения, расхода, состава и т. п.

По характеру изменения регулирующего воздействия автоматические регуляторы подразделяются на регуляторы с линейными и нелинейными законами регулирования.

Примером регуляторов с *нелинейным законом* регулирования могут служить двухпозиционные регуляторы температуры в холодильных машинах. В трехпозиционных дискретных системах выходной сигнал может принимать три значения: -1 , 0 , $+1$, т.е. “меньше”, “норма”, “больше”. Качество работы таких САР выше, хотя их надежность ниже.

Регуляторы с *линейным законом* регулирования по математической зависимости между входными и выходными сигналами подразделяются на следующие основные виды:

- пропорциональные (П-регуляторы);
- пропорционально-интегральные (ПИ-регуляторы);

- пропорционально-дифференциальные (ПД-регуляторы);
- пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД-регуляторы);
- позиционные.

В зависимости от вида используемой энергии регуляторы подразделяются на электрические (электромеханические, электронные), пневматические, гидравлические и комбинированные.

В зависимости от задающего воздействия и параметров объекта регулирования подбирают регулятор с определенной характеристикой W_p . Изменение W_p адекватно ведет к изменению коэффициентов дифференциального уравнения общего передаточного звена (регулятор-объект) и тем самым достигается необходимое качество регулирования. В промышленных регуляторах эти величины называются *параметрами настройки*. Параметрами настройки являются: коэффициент усиления, зона нечувствительности, постоянная времени интегрирования, постоянная времени дифференцирования и т. д. Для изменения параметров настройки в регуляторах имеются органы настройки (управления).

Кроме органов настройки основных параметров, регуляторы имеют также органы настройки, косвенно влияющие на эти коэффициенты или режимы его работы, например, органы настройки, изменяющие чувствительность регулятора, демпфирование входного сигнала и др.

На рис. 16 приведен пример контура регулирования температуры приточного воздуха в канальном кондиционере. Температура воздуха поддерживается водяным калорифером, через который пропускается теплоноситель. Воздух, проходя через калорифер, нагревается. Температура воздуха после водяного калорифера измеряется датчиком (Т), далее эта величина поступает на устройство сравнения (УС) измеренного значения температуры ($T_{изм}$) и заданного ($T_{зад}$). В зависимости от разности между температурой уставки и измеренным значением температуры регулятор (Р) вырабатывает сигнал, воздействующий на исполнительный механизм (М – электропривод трехходового клапана). Электропривод открывает или закрывает трехходовой клапан до положения, при котором ошибка будет стремиться к нулю.

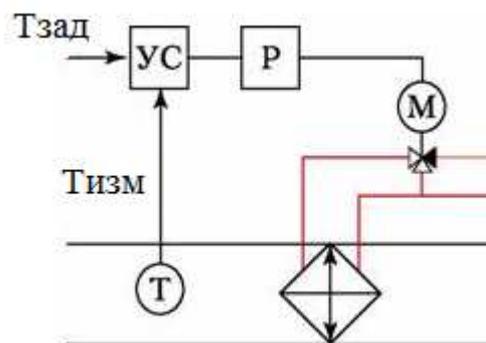


Рисунок 16. Контур регулирования температуры приточного воздуха в канале центрального кондиционера.

Выходным сигналом регулятора может быть напряжение в определенном диапазоне (например, постоянное напряжение в диапазоне от 0 до 10 В, ток 0–20мА и т. д). Диапазон изменения выходного сигнала называется диапазоном регулирования (рис. 17). Диапазон изменения сигнала ошибки называют пропорциональным диапазоном.

В *П-регуляторах* имеется возможность изменять диапазон регулирования и пропорциональный диапазон.

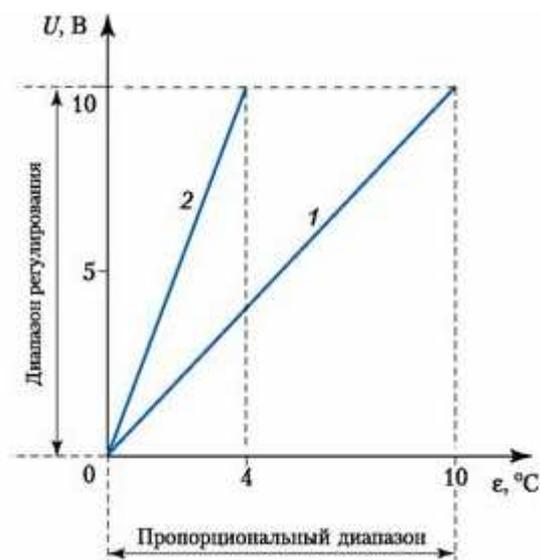


Рисунок 17. График пропорционального регулирования.

Из графика (рис. 17) видно, что чем меньше пропорциональный диапазон, тем круче характеристика регулирования. Кривая (1) соответствует диапазону изменения температуры 0–10 °С, а кривая (2) – диапазону 0–4 °С.

При больших значениях коэффициента регулирования в контуре регулирования могут возникнуть колебания (рис.18). Так, если во время включения системы температура воздуха $T_{изм}$ ниже заданной температуры $T_{зад}$, устройство управления выдает большой сигнал на открытие трехходового клапана. Температура водяного калорифера и приточного воздуха начнет повышаться.

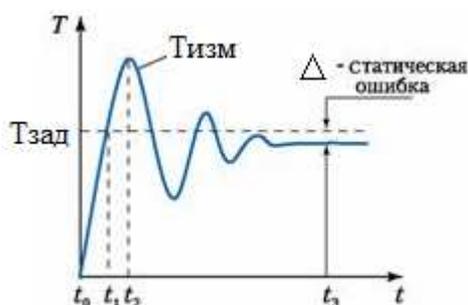


Рисунок 18. Переходной процесс при пропорциональном (П) регулировании.

Когда температура приточного воздуха после водяного калорифера достигает $T_{зад}$, устройство управления выдает команду на закрытие трехходового клапана (точка t_1 , рис. 18).

Однако из-за того, что калорифер разогрет, температура приточного воздуха до момента t_2 еще будет расти, а затем начнет снижаться. Этот процесс имеет вид затухающих колебаний, и через определенное время (t_3) процесс стабилизируется. Чем большим выбран пропорциональный диапазон регулирования, тем большей будет величина статистической ошибки. При малой величине пропорционального диапазона увеличивается время переходных процессов, и при некоторых условиях может возникнуть автоколебательный (незатухающий) процесс в контуре регулирования.

Путем выбора параметров регулирования П-регулятора можно существенно уменьшить установившуюся ошибку регулирования, однако ее полное устранение не представляется возможным даже теоретически.

На рис. 19 представлена структурная схема П-регулятора, а на рис. 20 – реализуемый ею закон регулирования.

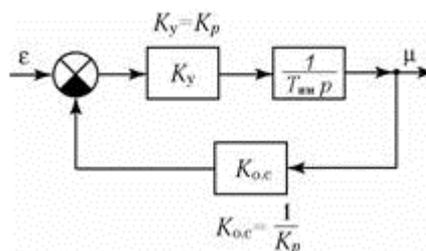


Рисунок 19. Структурная схема П-регулятора.

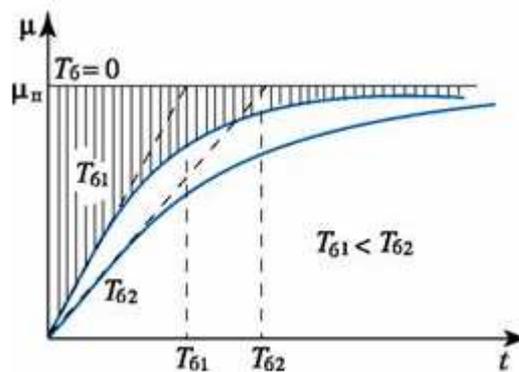


Рисунок 20. Закон П-регулирования.

Параметром настройки регулятора является коэффициент передачи устройства обратной связи $k_{ос}$. Коэффициент передачи регулятора $k_{п}$ тем больше, чем меньше $k_{ос}$. Однако следует иметь в виду, что чем больше $k_{п}$, тем больше постоянная времени балластного звена и тем больше искажается идеальный закон П-регулирования. П-регулирование позволяет уменьшить установившуюся статическую ошибку, но только $(1+k)$ раз, поэтому регулирование будет статическим.

Статическую ошибку, возникающую при пропорциональном регулировании, можно исключить, если кроме пропорционального ввести

еще и интегральное звено. Последнее образуется путем постоянного суммирования ϵ за определенный промежуток времени и формирования сигнала управления, пропорционального полученной величине.

Постоянная времени интегрирования в *И-регуляторе* равна времени, в течение которого с момента поступления на вход регулятора постоянного сигнала сигнал на выходе регулятора достигнет значения, равного значению входного сигнала.

Переходной процесс в И-регуляторе показан на рис. 21, б. Устраняя статическую ошибку интегральный регулятор, однако, ухудшает качество переходного процесса. Поэтому на практике применяют комбинированные *ПИ-регуляторы*.

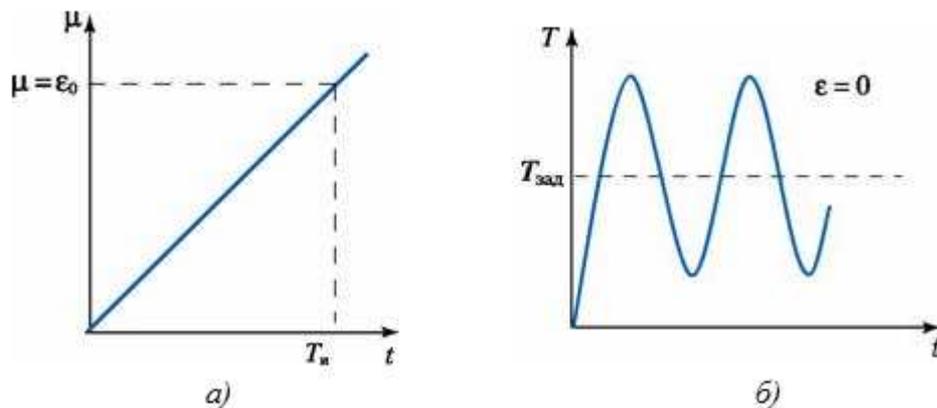


Рисунок 21. Закон регулирования (а) и переходной процесс (б) при интегральном (И) регулировании.

При этом используется как параллельное соединение пропорционального и интегрального звена (рис. 22, а), так и последовательного (рис. 22, б).

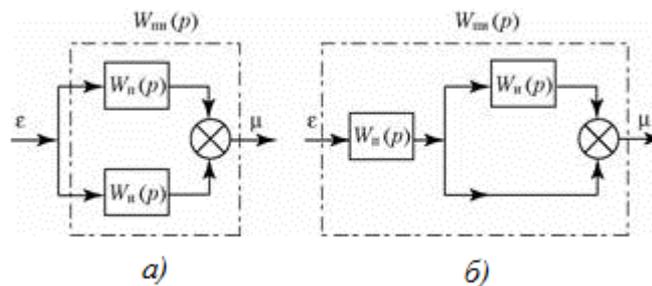


Рисунок 22. Структурная схема идеальных ПИ-регуляторов.

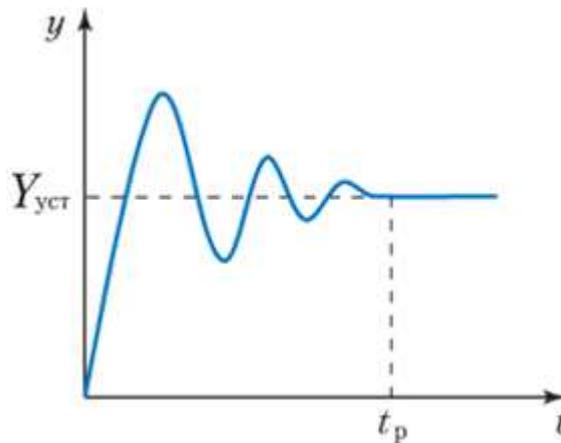


Рисунок 23. Переходной процесс при пропорционально-интегральном (ПИ) регулировании.

Сочетает точность И-регулирования и быстродействие П-регулирования.

П- и ПИ-регуляторы не могут упреждать ожидаемое отклонение регулируемой величины, реагируя только на уже имеющееся отклонение. Возникает необходимость в регуляторе, который вырабатывал бы дополнительное регулирующее воздействие, пропорциональное скорости отклонения регулируемой величины от заданного значения.

Такое регулирующее воздействие используется в дифференциальных и ПИД-регуляторах. ПИД-регуляторы воздействуют на объект пропорционально отклонению ε регулируемой величины, интегралу от этого отклонения и скорости изменения регулируемой величины.

По возможностям ПИД-регуляторы являются универсальными. Используя их, можно получить любой закон регулирования.

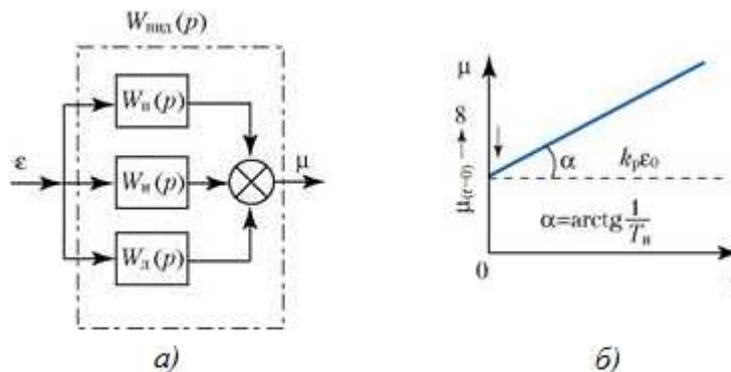


Рисунок 24. Структурная схема ПИД-регулятора (а) и закон ПИД-регулирования (б).

При скачкообразном изменении регулируемой величины ПИД-регулятор в начальный момент времени оказывает мгновенное бесконечно большое воздействие на объект регулирования, затем величина воздействия резко падает до значения, определяемого пропорциональной составляющей, после чего постепенно начинает оказывать влияние интегральная

составляющая регулятора. Переходной процесс при этом (рис. 25) имеет минимальные отклонения по амплитуде и по времени.

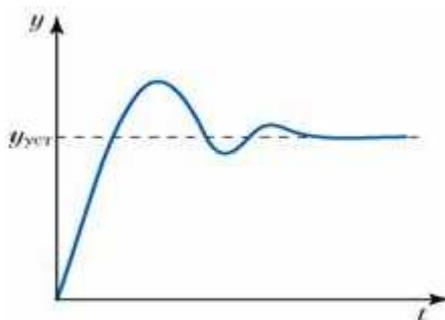


Рисунок 25. Переходной процесс при ПИД-регулировании.

Параметрами настройки ПИД-регуляторов являются коэффициент пропорциональности регулятора k_p , постоянная времени интегрирования T_i и постоянная времени дифференцирования T_d . [3]

ГЛАВА 5. Анализ инвариантных систем управления

«Инвариантность» означает независимость одной физической величины от другой. В теории управления рассматривают независимость в основном двух выходных величин – выходной величины и сигнала ошибки от входных воздействий. В системах стабилизации необходимо добиваться независимости выходной величины от возмущающего воздействия, а в следящих системах – независимости сигнала ошибки от задающего воздействия.

Инвариантность в АСУ достигается компенсацией возмущающего воздействия, когда управляющее воздействие формируется в зависимости от изменений возмущающего воздействия. Этот принцип управления применим, если возмущающее воздействие измеряемо. Обычно принцип управления по возмущению применяют в сочетании с принципом управления по отклонению (комбинированная система).

Теоретически в системе можно достичь абсолютной инвариантности. В этом случае передаточная функция замкнутой системы должна быть равна единице. Это означает, что такая система автоматического управления должна иметь полосу пропускания по частоте без амплитудных и фазовых искажений, равную бесконечности. В реальных системах обеспечить бесконечную полосу пропускания невозможно, поэтому реализация полной инвариантности по управляющему воздействию сопряжена с принципиальными трудностями, связанными с реализуемостью передаточной функции корректирующего устройства, уменьшающего ошибку системы. Если передаточная функция компенсирующего устройства реализуема приближенно, то в системе осуществима частичная

инвариантность. Частичная инвариантность может значительно повысить точностные характеристики замкнутых АСУ [4].

Многосвязным называется объект, имеющий несколько входов и несколько выходов, при этом различают односвязные объекты, когда одна входная величина влияет только на одну выходную (рис. 26)

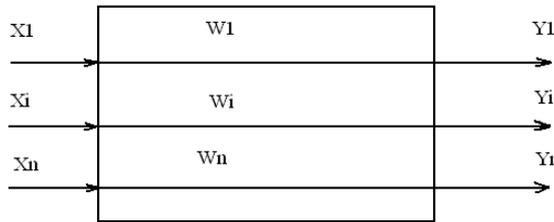


Рисунок 26. Структурная схема односвязного объекта.

или непосредственно многосвязные, в которых одна выходная величина может зависеть от нескольких входных (рис 27).

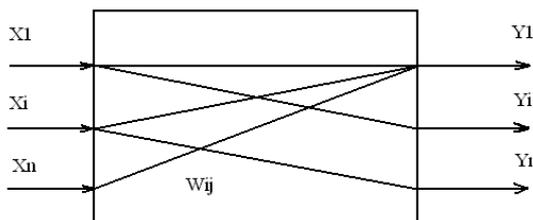


Рисунок 27. Структурная схема многосвязного объекта.

Существует два подхода к управлению многосвязными объектами: – несвязное управление, когда каждая прямая связь рассматривается и управляется отдельно без учёта перекрестных связей (рис. 28);

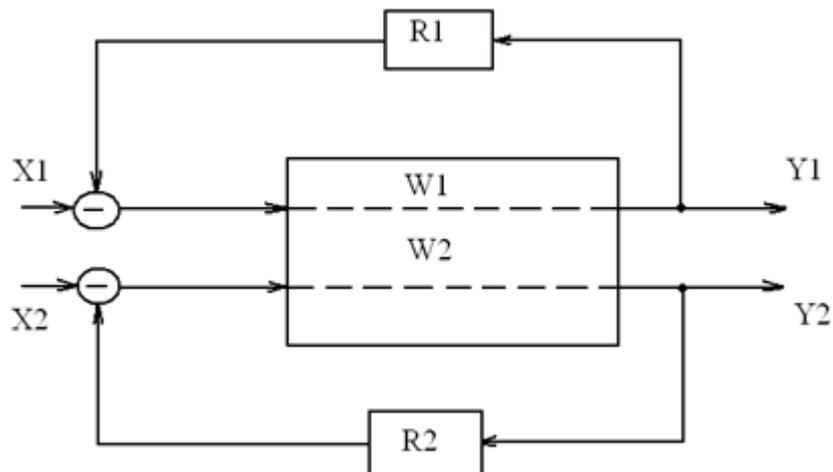


Рисунок 28. Несвязное управление без учета перекрестных связей.

или с учетом только перекрестных связей (рис. 29).

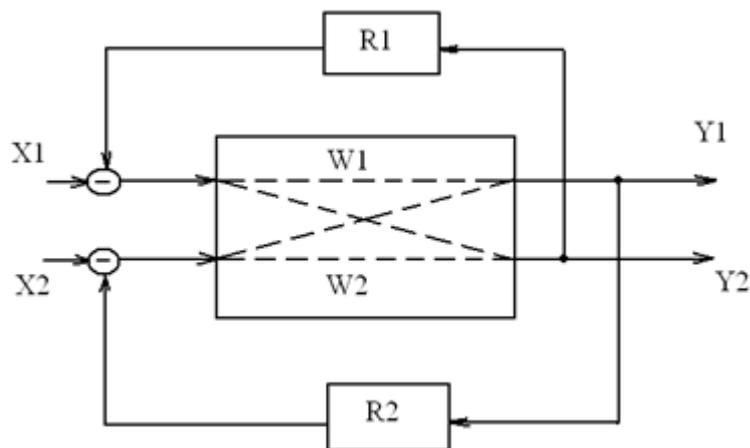


Рисунок 29. Несвязное управление с учетом только перекрестных связей.

– связанное регулирование с учетом как прямых, так и перекрестных связей (рис. 30).

Как видно, увеличение входных и выходных координат приводит к пропорциональному увеличению управляющих устройств, к усложнению схемы и, как следствие, к меньшей вероятности её технической реализации.

Системы, в которых регулируются несколько величин, называют многомерными или многосвязными. Примерами многосвязных систем могут служить: паровой котел, в котором одновременно регулируются давление пара, его температура, разрежение в топке, процент CO_2 ; самолет, у которого регулируются курс, угол крена, скорость, высота; прокатный стан, где регулируются скорость и толщина прокатываемой полосы и т. д.

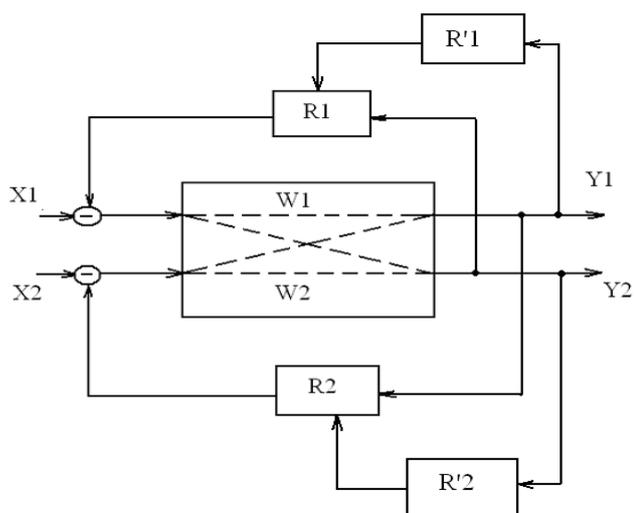


Рисунок 30. Структурная схема системы при связанном управлении.

В терминах «многомерные» и «многосвязные» системы понятия

«мерности» и «связности» не совпадают с понятиями порядка или размерности системы. Так, в двухмерной системе, в которой регулируются две величины, порядок уравнения, определяющий размерность системы, может быть любым.

Для многосвязных систем характерно наличие связей между регулируемыми величинами. Связи эти могут быть двух родов. Первый род связей обусловлен физическими свойствами регулируемого объекта. Так, если мы увеличиваем подачу топлива в котел, то при этом повышаются и температура, и давление пара. Увеличение скорости вращения синхронной машины одновременно приводит к увеличению частоты и напряжения переменного тока. Связи первого рода будем называть внутренними связями. Второй род связей накладывается на систему по условиям, определяемым технологическим процессом. Например, летчику могут задаваться отдельно курс и высота полета, а скорость должна регулироваться таким образом, чтобы обеспечивался минимальный расход топлива. В этом случае требуется, чтобы часть регулируемых координат была независимой друг от друга (курс и высота), а координаты другой части (высота и скорость) были связаны между собою, причем эта связь определяется выбранным для системы критерием оптимальности.

Основы расчета многосвязных систем является принцип инвариантности: отклонение выходной величины y должно быть тождественно равно 0 при любых задающих и возмущающих воздействиях.

Чтобы это выполнялось необходимо:

- во-первых, идеальная компенсация всех возмущений;
- во-вторых, идеальная реализация задающих сигналов.

В физически существующих системах выполнение принципа инвариантности невозможно. Поэтому чаще всего довольствуются частичной инвариантностью, для чего сначала определяют передаточную функцию динамических компенсаторов.

На практике передаточную функцию выбирают из числа существующих типовых звеньев, динамические характеристики, которых наиболее близки к расчетным (чаще всего это реальное дифференциальное звено).

ГЛАВА 6. Анализ особенностей программного средства для выполнения лабораторных работ

Закрепление теоретических знаний, полученных при освоении дисциплины «Основы теории управления», осуществляется в основном при выполнении лабораторных работ, представленных в приложении А. Используемая для этого программная среда – «Visual Simulator».

Программа VisSim предназначена для построения, исследования и оптимизации виртуальных моделей физических и технических объектов, в том числе и систем управления. VisSim это аббревиатура выражения Visual Simulator – визуальная, воспринимаемая зрением, среда и средство моделирования.

Программа предоставляет человеку развитой графический интерфейс, используя который, исследователь создает модель из виртуальных элементов с некоторой степенью условности так же, как если бы он строил реальную систему из настоящих элементов. Это позволяет создавать, а затем исследовать и оптимизировать модели систем широкого диапазона сложности.

При описании и последующем построении модели в среде VisSim нет необходимости записывать и решать дифференциальные уравнения, программа это сделает сама по предложенной ей исследователем структуре системы и параметрам ее элементов. Результаты решения выводятся в наглядной графической форме. Поэтому программой могут пользоваться и те, кто не имеет глубоких познаний в математике и программировании.

При использовании VisSim 'а не требуется владеть программированием на языках высокого уровня или ассемблере. В то же время, специалисты, владеющие программированием, могут создавать собственные блоки, дополняя ими богатую библиотеку стандартных блоков VisSim'а.

Моделирование систем управления это далеко не весь круг задач, которые можно решать в VisSim. Например, в этой программе при желании можно решать дифференциальные уравнения, и VisSim делает это значительно эффективнее и быстрее, чем известная программа математической направленности MathCAD. При соизмеримой и более высокой производительности, чем у программы Simulink, входящей в солидный программный пакет MathLab, VisSim занимает в сотни раз меньше места на жестком диске и в оперативной памяти.

Блоки VisSim'а можно условно разделить на три основных категории и одну дополнительную:

- блоки, имеющие только выход: генераторы;
- блоки, имеющие вход и выход: преобразователи;
- блоки, имеющие только вход: индикаторы;
- осциллограф;
- цифровой индикатор;
- блоки без входов и выходов: надписи, комментарии и др.

Важным компонентом модели является соединительная линия – виртуальный аналог физического соединения элементов, передающего

воздействия от одного элемента к другому. Соединительные линии в VisSim'е однонаправленные, передают сигналы с выхода одного блока к входу другого. Поэтому при построении модели следует так разделять реальную систему на функциональные блоки, чтобы последующий блок практически не влиял на функционирование предыдущего. Например, выходное электрическое сопротивление предыдущего блока должно быть значительно меньше входного сопротивления последующего блока.

При этом входные и выходные сигналы могут быть как одиночными функциями времени, так и набором таких функций. В последнем случае сигнал называется векторным, как и соответствующий вход или выход блока [5].

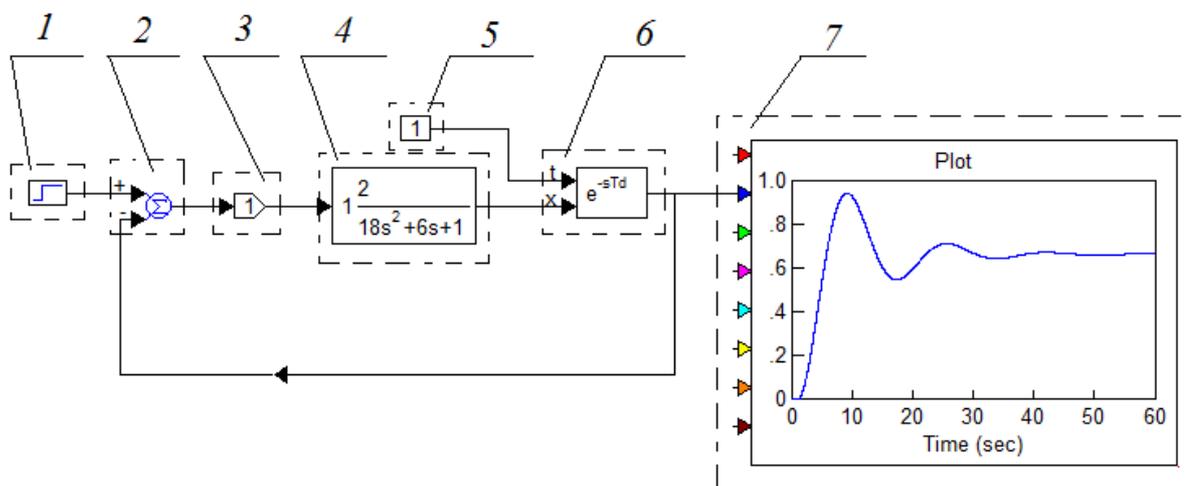
Цель работы: Изучение поведения замкнутой системы автоматического

Протокол			
выполнения лабораторной работы № 1 по дисциплине «Основы теории управления»			
<i>«Исследование качества переходных процессов замкнутой системы регулирования с обратной связью»</i>			
ФИО студента		Подпись преподавателя	
Группа		Дата отчета	
Дата выполнения		Оценка, баллы	

регулирования с обратной связью при изменении параметров управляющего устройства.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Реализовать в программном средстве VisSim структурную схему замкнутой системы регулирования с обратной связью с заданными параметрами входящих в нее элементов.



где 1 – блок формирования входного воздействия (единичный скачек);

2 – сумматор (для формирования отрицательного сигнала необходимо навести курсор на изменяемый знак и одновременно нажать Ctrl и правую кнопку мышки);

3 – передаточная функция управляющего устройства (k_1 – переменный параметр в ходе лабораторной работы);

4, 5, 6 – передаточная функция объекта управления (числовые значения коэффициентов выбираются согласно варианту из таблицы 1);

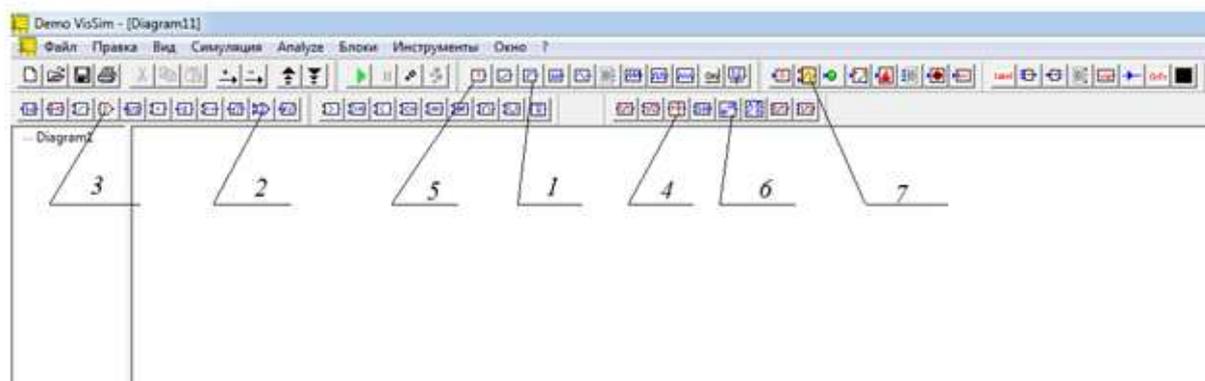
$$W_o = \frac{k}{2Ts^2 + Ts + 1} \cdot e^{-s\tau}$$

7 – блок реализации переходного процесса системы управления.

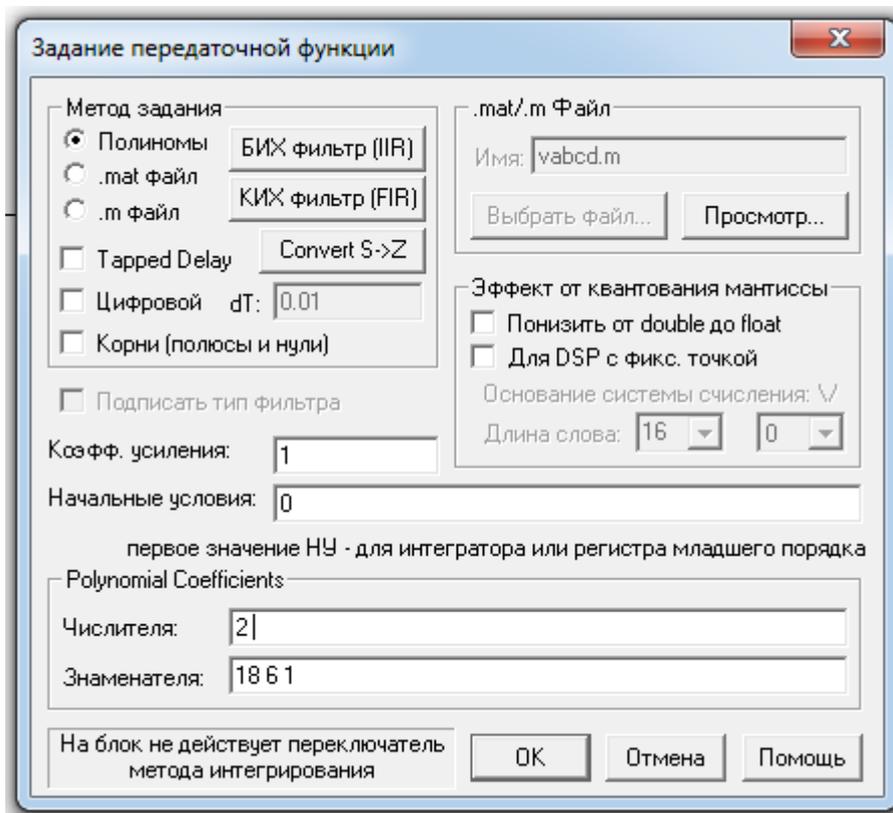
Таблица 1.

Номер варианта	к, коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ, время запаздывания	Номер варианта	к, коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ, время запаздывания	Номер варианта	к, коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ, время запаздывания
1	2	23	2	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	5	19	3	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3
3	4	14	1,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	1,2	21	4	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	3,7	16	5	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	4,2	26	3,5	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	0,9	31	4,2	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	0,7	18	0,8	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	1,8	15	1,9	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	5,3	27	2,5	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	2,2	33	3,7	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	3,9	12	0,9	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

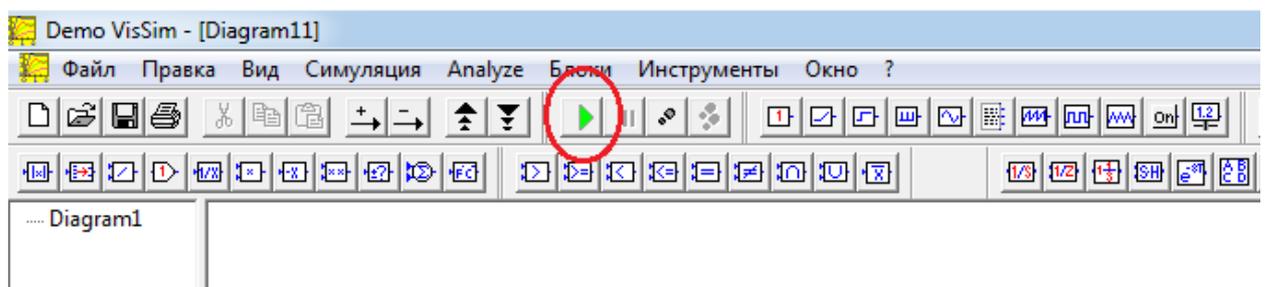
На рабочем поле программного средства VisSim из панели блоков выбираются необходимые для построения схемы управления. Соединение блоков осуществляется с помощью курсора (курсор ведется от одного блока к другому с вычерчиванием зеленой линии).



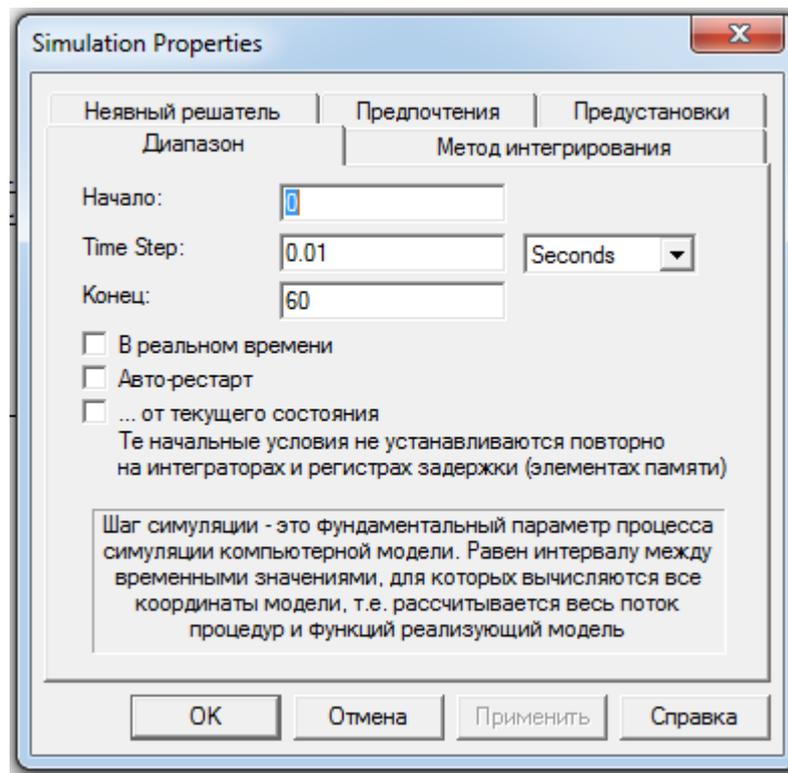
Чтобы задать параметры блока 4 по нему надо щелкнуть 2 раза мышью и в открывшемся окне ввести численные значения коэффициентов функции W_0 согласно варианту в графе числитель и знаменатель. Числа вводятся через пробел без знаков вычисления и переменной s .



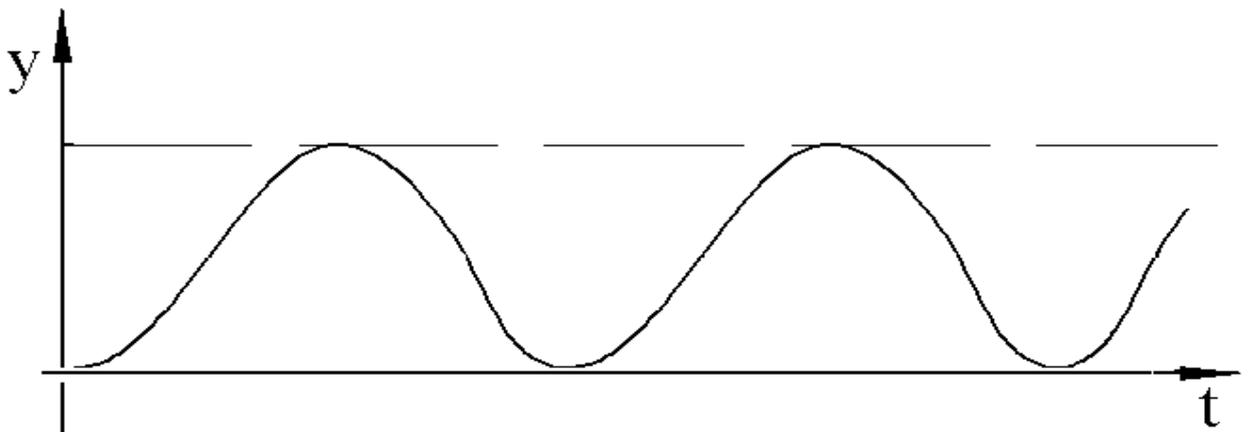
Чтобы запустить переходный процесс – нажать зеленую стрелку на панели блоков.



При изменении длительности переходного процесса в окне блока 7 (более 10) необходимо на панели блоков нажать «Симуляция» → «Настройки симуляции» → «Конец» и установить численное значение больше 10.



2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 3), определить при каком численном значении k_1 система находится на границе устойчивости. Признаком границы устойчивости является наличие колебаний переходного процесса с одинаковой амплитудой.



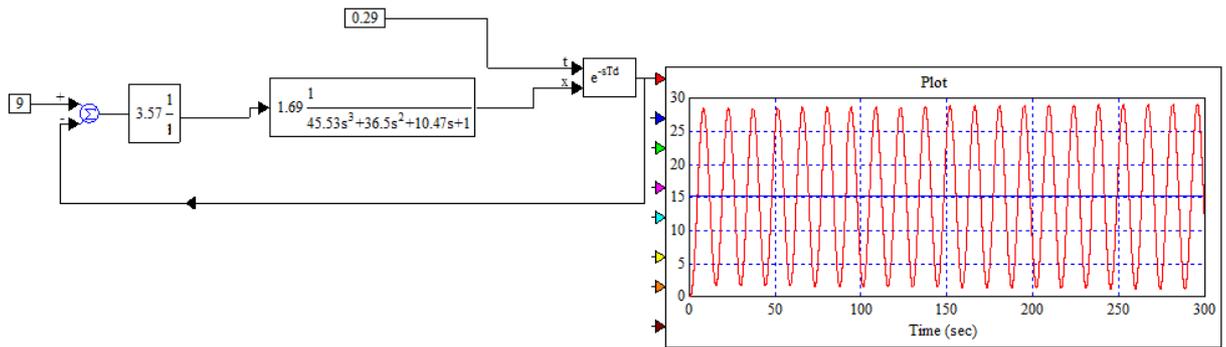
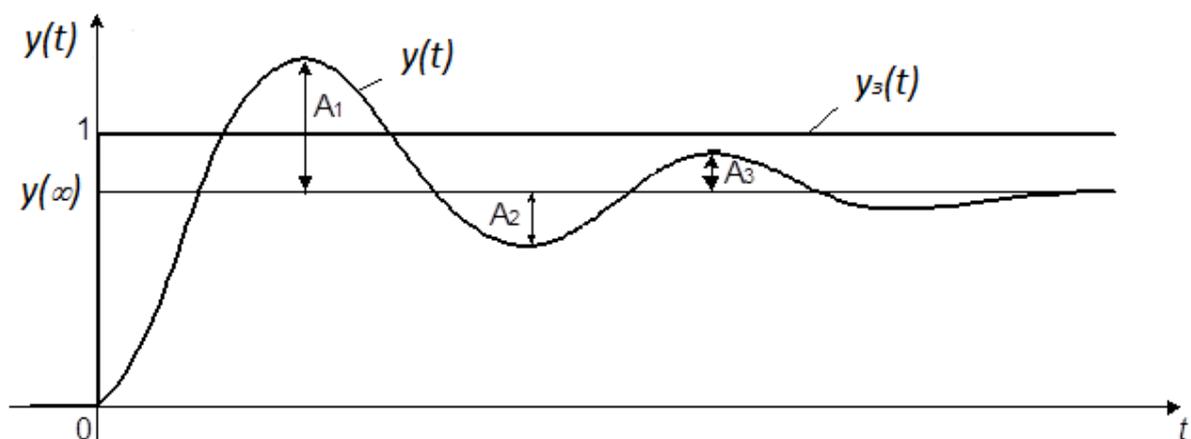


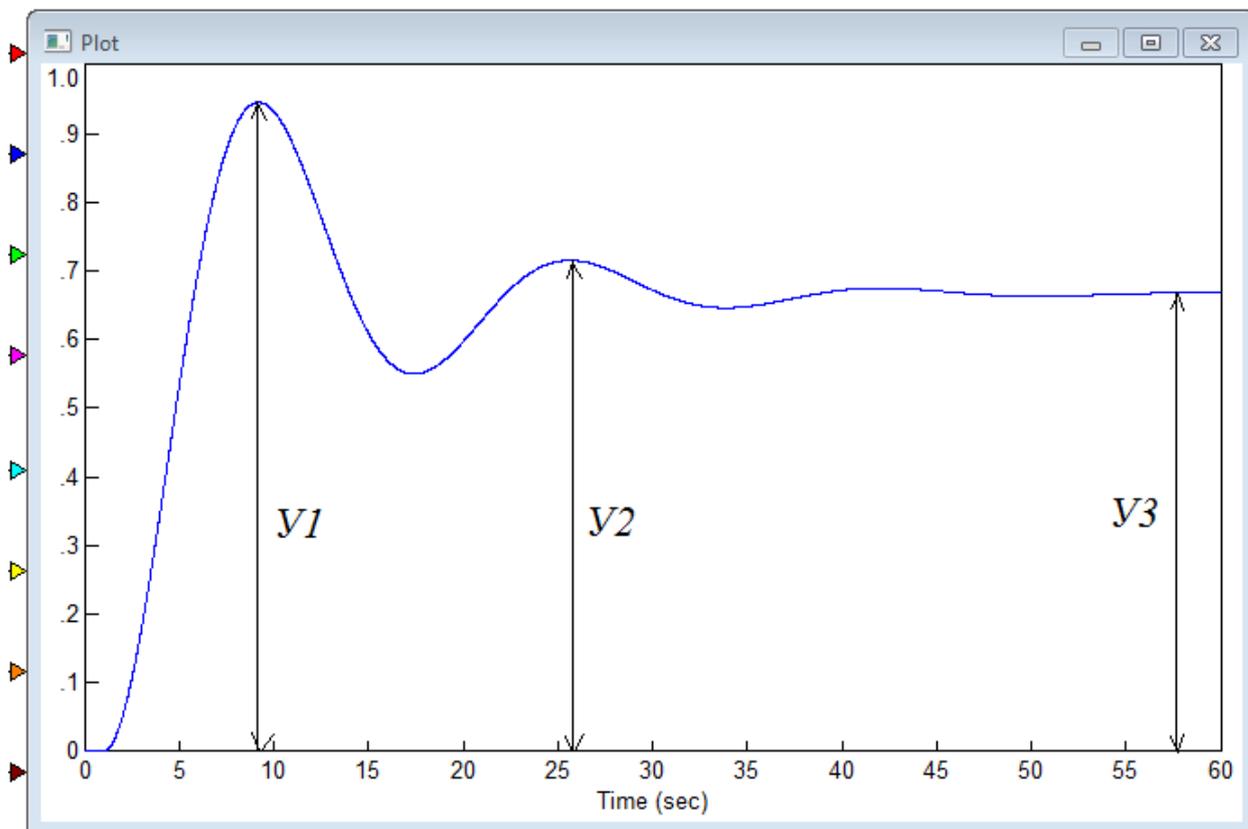
Схема системы управления при искомом коэффициенте пропорциональности копируется из VisSim и вставляется в «Протокол выполнения лабораторной работы» (файл Word).

3. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 3), получить значение показателя качества «степень затухания» $\Psi=0,85$. Численное значение степени затухания рассчитывается по формуле:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1}$$

где $A_1=U1-U3$ и $A_3=U2-U3$ – параметры переходного процесса, определяемые на графике.

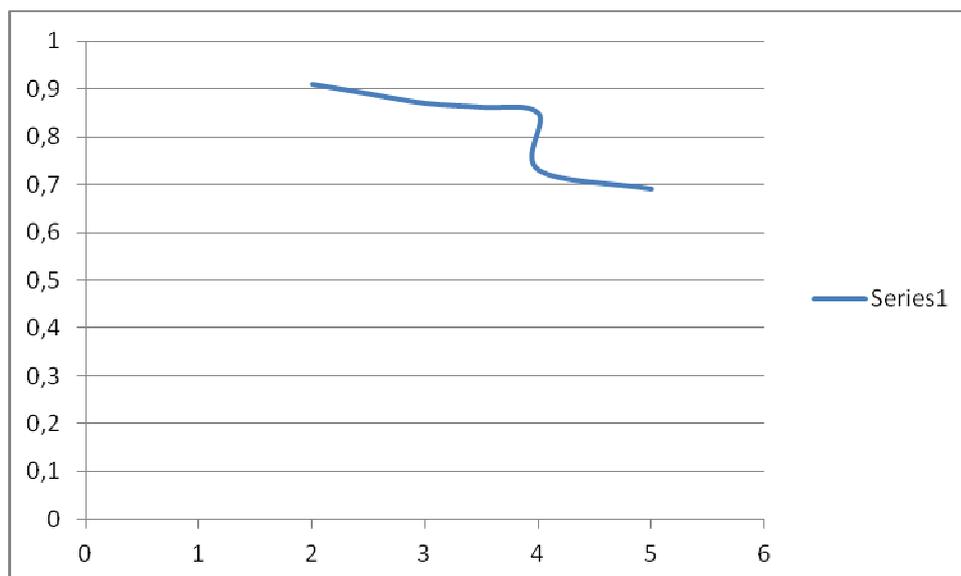




4. В ходе выполнения лабораторной работы, заполнить таблицу для значений степени затухания (таблица 2) и по данным таблицы построить график зависимости показателя качества Ψ от пропорционального коэффициента k_1 .

Таблица 2.

k_{1i}												
Ψ_i												



5. Занести в протокол схему системы управления и переходный процесс, которые соответствуют требуемому качеству работы системы.
6. «Протокол выполнения лабораторной работы» должен содержать:
- шапку протокола с заполненными графами данных студента и даты выполнения лабораторной работы;
 - цель лабораторной работы;
 - передаточную функцию объекта управления в редакторе формул с численными значениями ее коэффициентов;
 - схему системы управления (из VisSim), которая находится на границе устойчивости;
 - схему системы управления (из VisSim), которая соответствует требуемому качеству работы системы;
 - заполненную таблицу 2;
 - график зависимости показателя качества Ψ от пропорционального коэффициента k_1 (построенный в Excel).

Протокол выполнения лабораторной работы № 2 по дисциплине «Основы теории управления»			
<i>«Определение передаточной функции объекта управления методом активного эксперимента»</i>			
ФИО студента		Подпись преподавателя	
Группа		Дата отчета	
Дата выполнения		Оценка, баллы	

Цель работы: Изучение особенностей методов активного эксперимента для расчета математического описания элементов системы автоматического управления.

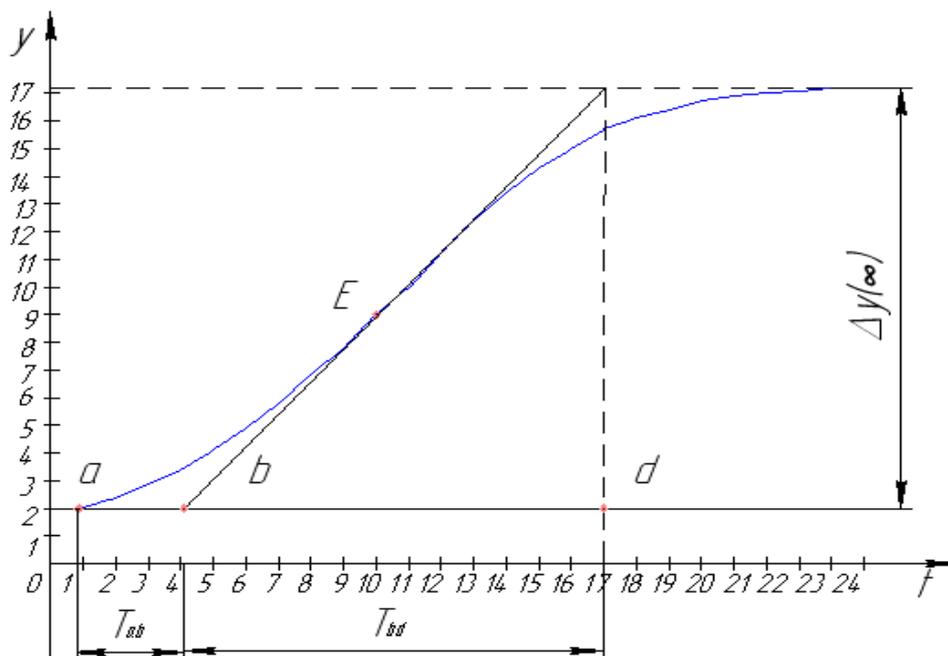
Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Рассчитать передаточную функцию объекта управления согласно предложенной методике с использованием графика переходного процесса, выданного преподавателем.

Непосредственно по графику переходного процесса определяется численное значение коэффициента усиления k по формуле:

$$k = \frac{\Delta y(\infty)}{\Delta x} = \frac{15.2}{9} = 1.69,$$

где Δx – величина входного возмущающего воздействия (выдается преподавателем согласно варианту).



Затем на графике переходного процесса (см. рис.) находится точка перегиба Е, которая отмечает место перехода вогнутой части графика в выгнутую. К точке перегиба строится касательная и отсекает на оси абсцисс отрезки времени T_{ab} и T_{bd} : $T_{ab} = 3.1$; $T_{bd} = 12.9$ (данные отрезков из примера, в расчете же используются длины отрезков, полученные по выданному графику).

По отношению $\frac{T_{ab}}{T_{bd}} = 0.24$ из таблицы 1 определяется порядок объекта управления n и значения вспомогательных коэффициентов k_1 и k_2 . Исходя из рассчитанного значения отношения в таблице 1 выбирается ближайшее **меньшее** к рассчитанному число.

Таблица 1.

$\frac{T_{ab}}{T_{bd}}$	n	k_1	k_2
0	1	1	0
0,104	2	2,718	0,282
0,218	3	3,695	0,805
0,319	4	4,463	1,425
0,41	5	5,119	2,1

$$n = 3$$

$$k_1 = 3.695$$

$$k_2 = 0.805$$

Передаточная функция объекта определяется выражением:

$$W(p) = \frac{k}{(Tp+1)^n} e^{-p\tau}$$

где $T = \frac{T_{bd}}{k_1} = \frac{12.9}{3.695} = 3.491$ – постоянная времени;

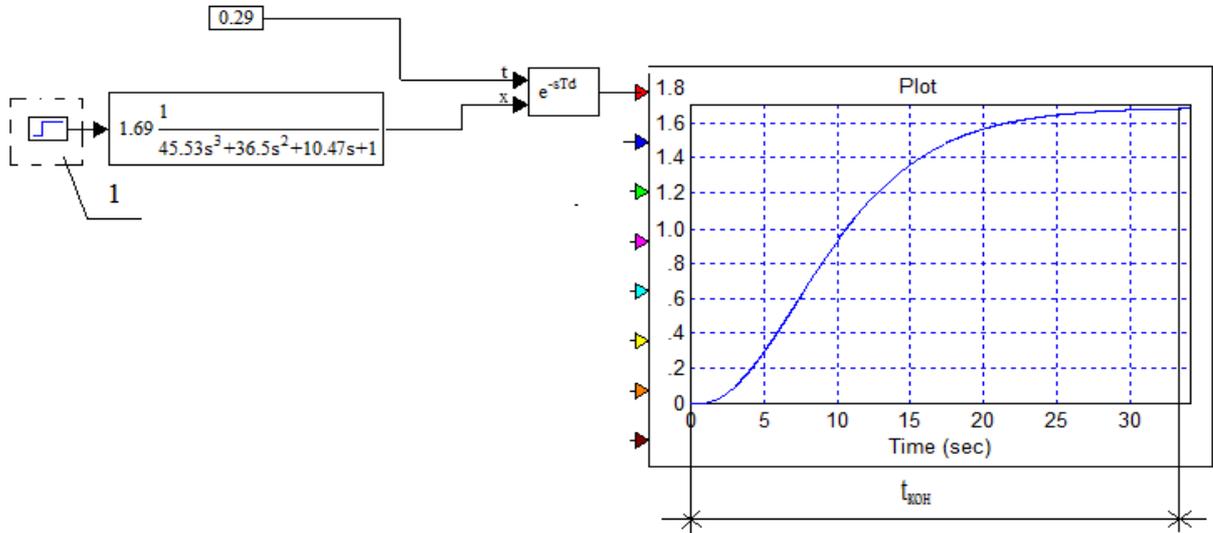
$\tau_y = T \cdot k_2 = 3.491 \cdot 0.805 = 2.81$ – условное время запаздывания;

$\tau = T_{ab} - \tau_y = 3.1 - 2.81 = 0.29$ – абсолютное время запаздывания.

Таким образом, передаточная функция объекта управления согласно расчётам имеет вид:

$$W(p) = \frac{1.69}{(3.49 \cdot p + 1)^3} \cdot e^{-p \cdot 0.29} = \frac{1.69}{42.53p^3 + 36.56p^2 + 10.47p + 1} \cdot e^{-p \cdot 0.29}$$

2. Реализовать в программном средстве VisSim структурную схему разомкнутой системы, используя в качестве объекта управления рассчитанную в п. 1 передаточную функцию (правила построения и соединения блоков в структурной схеме в программном средстве VisSim см. в лабораторной работе № 1).



В структурной схеме в качестве величины возмущающего воздействия выбирается Δx из исходных данных (в блоке 1: амплитуда = Δx).

3. Исследовать полученный в блоке визуализации переходный процесс и заполнить данными его изменения таблицу 2.

Используя возможности программного средства VisSim, снимаются координаты полученного переходного процесса и заносятся в таблицу 2. При этом время в таблице изменяется через 1, а $t_{\text{кон}}$ отмечается на графике переходного процесса в месте, где начинается прямая (см. рис.).

Таблица 2.

t	0	1	2	3	4	....			$t_{\text{кон}}$
$u_{\text{рас}}(t)$	0	....							u_{max}
σ	0	....							1

Численное значение величины σ , которая характеризует переходный процесс приведенный к единичному состоянию, рассчитывается по формуле:

$$\sigma = \frac{y(t)}{y_{\text{max}}}$$

4. Исследовать исходный переходный процесс (выданный преподавателем) и заполнить данными его изменения таблицу 3.

Таблица 3.

t	0	....							t _{кон}
у _{исх} (t)	0	....							у _{max}
σ	0	....							1

Принцип заполнения таблицы 3 данными аналогичен таблице 2.

5. Рассчитать относительную погрешность δ в процентах.

По данным таблиц 2 и 3 рассчитывается величина относительной погрешности:

$$\delta = \left| \frac{S_1 - S_2}{S_1} \right| \cdot 100\%,$$

где: S_1 – площадь под исходным графиком переходного процесса ($S_1 = \sum \sigma_{исх}$);

S_2 – площадь под расчетным графиком переходного процесса ($S_2 = \sum \sigma_{рас}$).

6. Сделать выводы по результатам работы:

- если величина δ не превышает 10 %, то рассчитанная передаточная функция адекватна исходному объекту управления;
- если величина δ больше 10 %, то рассчитанная передаточная функция не адекватна исходному объекту управления.

7. «Протокол выполнения лабораторной работы» должен содержать:

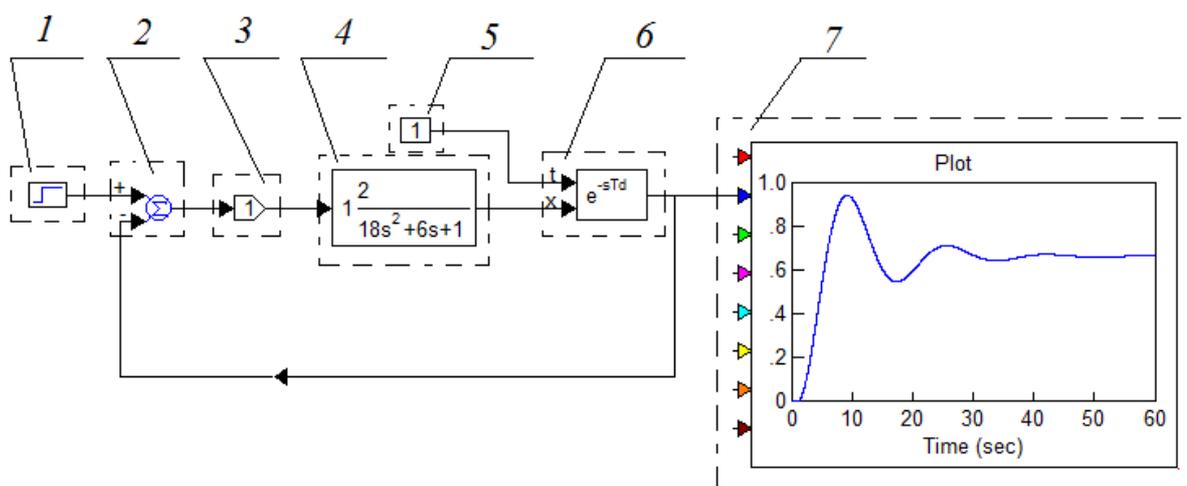
- шапку лабораторной работы (таблица с данными студента);
- цель лабораторной работы;
- передаточную функцию, рассчитанную в ходе лабораторной работы (в редакторе формул);
- структурную схему системы из программного средства VisSim;
- заполненные таблицы 2 и 3;
- вычисления погрешности δ в редакторе формул с численными значениями;
- выводы по результатам работы.

Протокол выполнения лабораторной работы № 3 по дисциплине «Основы теории управления»			
<i>«Исследование качества переходных процессов систем регулирования с управляющими устройствами различной структуры»</i>			
ФИО студента		Подпись преподавателя	
Группа		Дата отчета	
Дата выполнения		Оценка, баллы	

Цель работы: Повышение эффективности работы замкнутой системы регулирования путем изменения структуры управляющего устройства.

Порядок выполнения лабораторной работы.

1. Реализовать в программном средстве VisSim структурную схему замкнутой системы регулирования с обратной связью с заданными параметрами входящих в нее элементов.



где 1 – блок формирования входного воздействия (единичный скачек);

2 – сумматор (для формирования отрицательного сигнала необходимо навести курсор на изменяемый знак и одновременно нажать Ctrl и правую кнопку мышки);

3 – передаточная функция пропорционального управляющего устройства (k_1 – переменный параметр в ходе лабораторной работы);

4, 5, 6 – передаточная функция объекта управления (числовые значения коэффициентов выбираются согласно варианту из таблицы 1. Вариант – номер системного блока компьютера, на котором выполняется лабораторная работа);

$$W_o = \frac{k}{2Ts^2 + Ts + 1} \cdot e^{-s\tau}$$

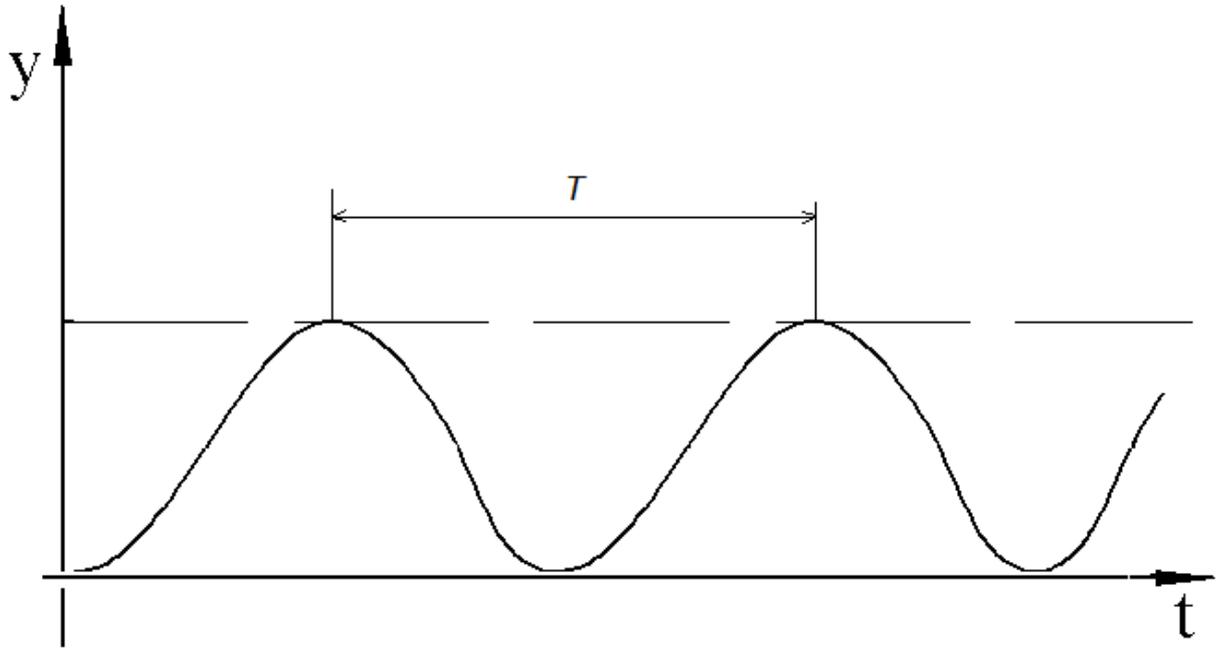
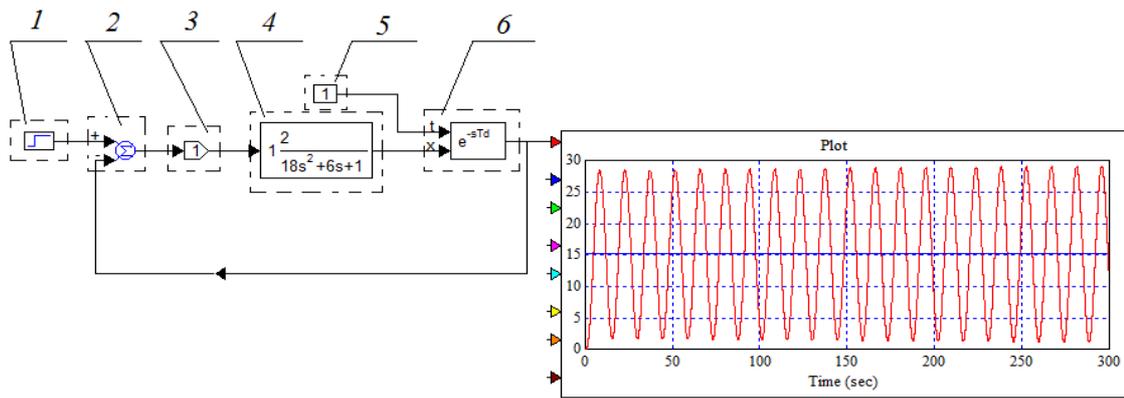
7 – блок реализации переходного процесса системы управления.

Таблица 1.

Номер варианта	К, коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ, время запаздывания	Номер варианта	К, коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ, время запаздывания	Номер варианта	К, коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ, время запаздывания
1	2	23	2	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	5	19	3	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3
3	4	14	1,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	1,2	21	4	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	3,7	16	5	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	4,2	26	3,5	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	0,9	31	4,2	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	0,7	18	0,8	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	1,8	15	1,9	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	5,3	27	2,5	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	2,2	33	3,7	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	3,9	12	0,9	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

Принципы формирования структурной схемы и задания параметров используемых блоков с использованием программного пакета VisSim – см. в лабораторной работе № 1.

- Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 3), определить при каком численном значении k_1 система находится на границе устойчивости. Признаком границы устойчивости является наличие колебаний переходного процесса с одинаковой амплитудой.

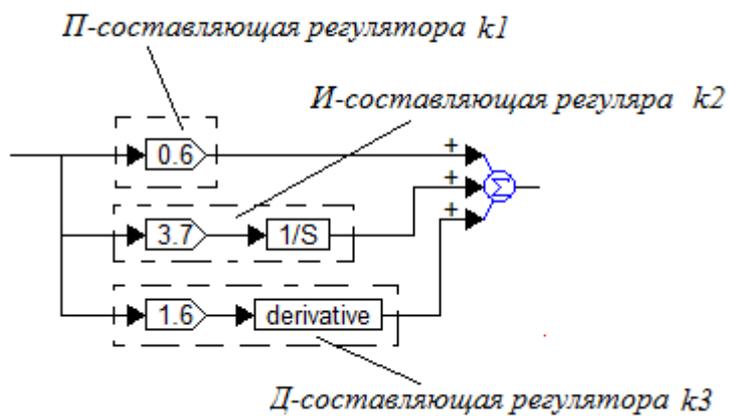
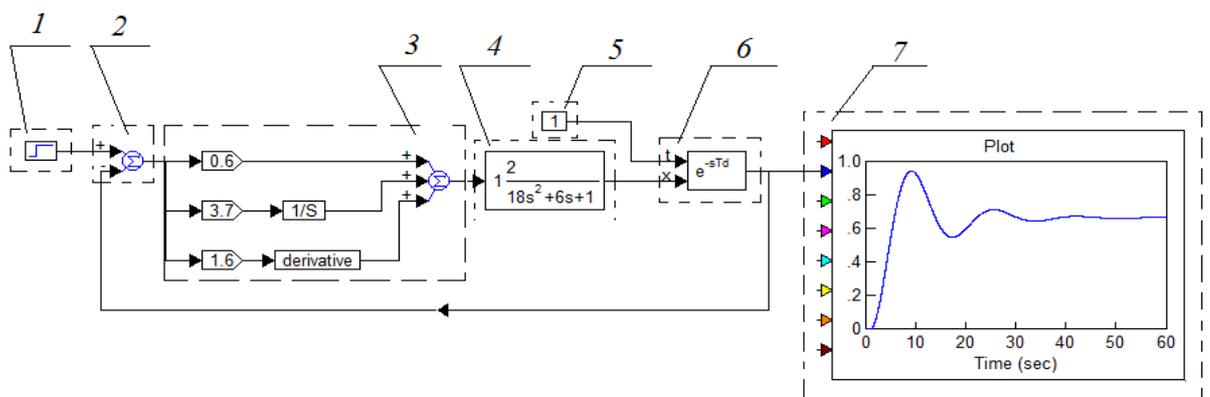
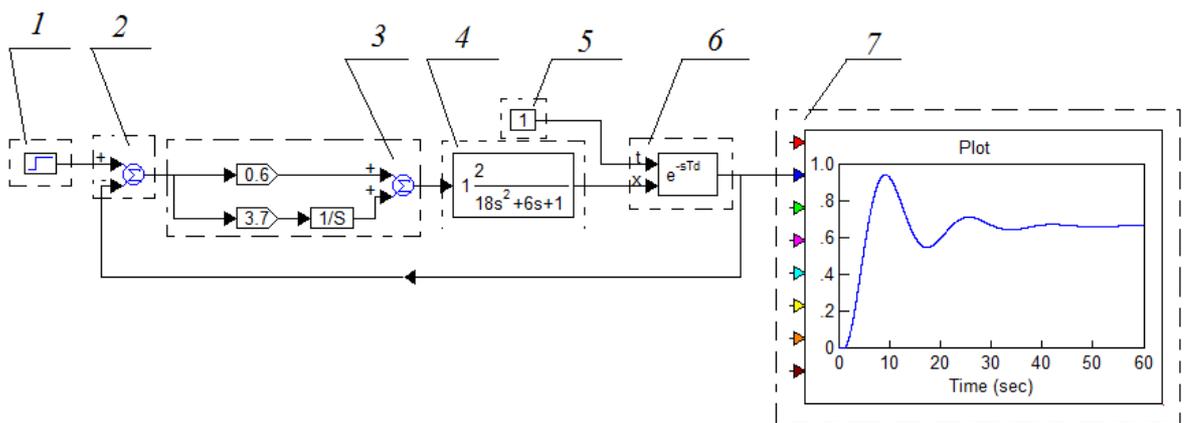
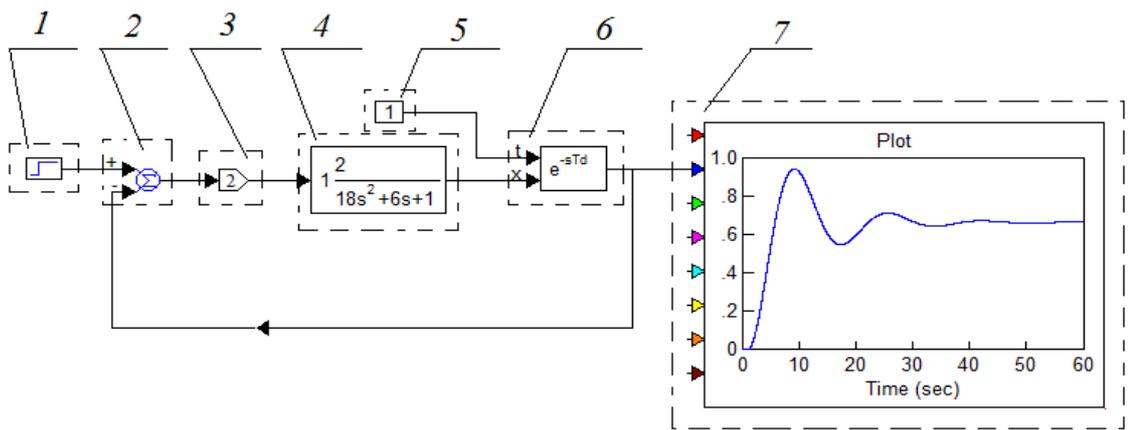


При возникновении данного режима работы фиксируются значения критического коэффициента k_1 и периода критических колебаний T . По значениям k_1 и T рассчитываются параметры настройки пропорционально (П-регулятора), пропорционально-интегрального (ПИ-регулятора), пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД-регулятора) регулятора (табл. 2).

Таблица 2.

П-регулятор	$k_1^o = 0,55 k_1$
ПИ-регулятор	$k_1^o = 0,45 k_1; k_2^o = 1,2/T$
ПИД-регулятор	$k_1^o = 0,6 k_1; k_2^o = 2/T; k_3^o = T/8$

3. Численные значения рассчитанных коэффициентов регуляторов подставляются в структурную схему системы регулирования с различными типами регуляторов: П, ПИ, ПИД.

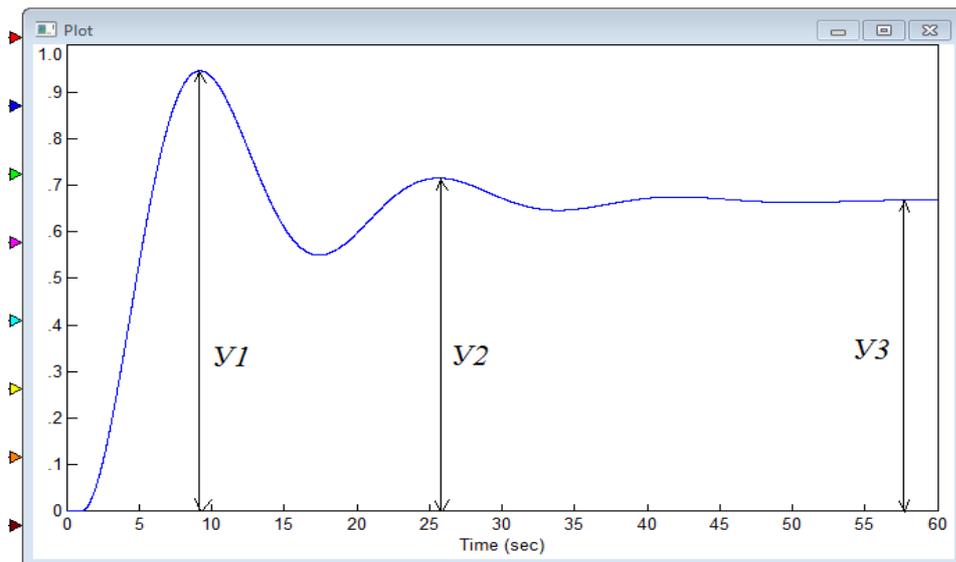
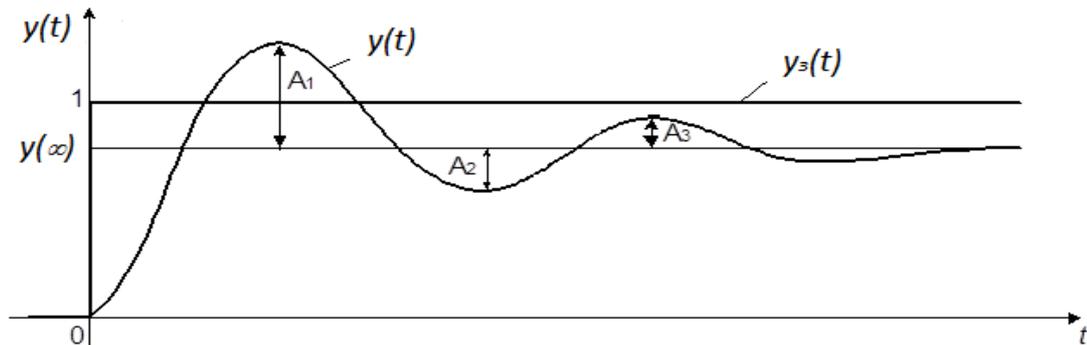


где:

4. Каждый из полученных переходных процессов для регуляторов различных типов исследуется на качество с использованием степени затухания. Численное значение степени затухания рассчитывается по формуле:

$$\psi = \frac{A_1 - A_3}{A_1}$$

где $A_1 = U_1 - U_3$ и $A_3 = U_2 - U_3$ – параметры переходного процесса, определяемые на графике.



5. По результатам лабораторной работы делается вывод об эффективности того или иного регулятора исходя из близости рассчитанного значения Ψ к 0,85.

6. «Протокол выполнения лабораторной работы» должен содержать:
- заполненную шапку лабораторной работы (таблица в начале данного протокола);
 - цель лабораторной работы;
 - передаточную функцию объекта управления W_o с числовыми значениями коэффициентов в редакторе формул;

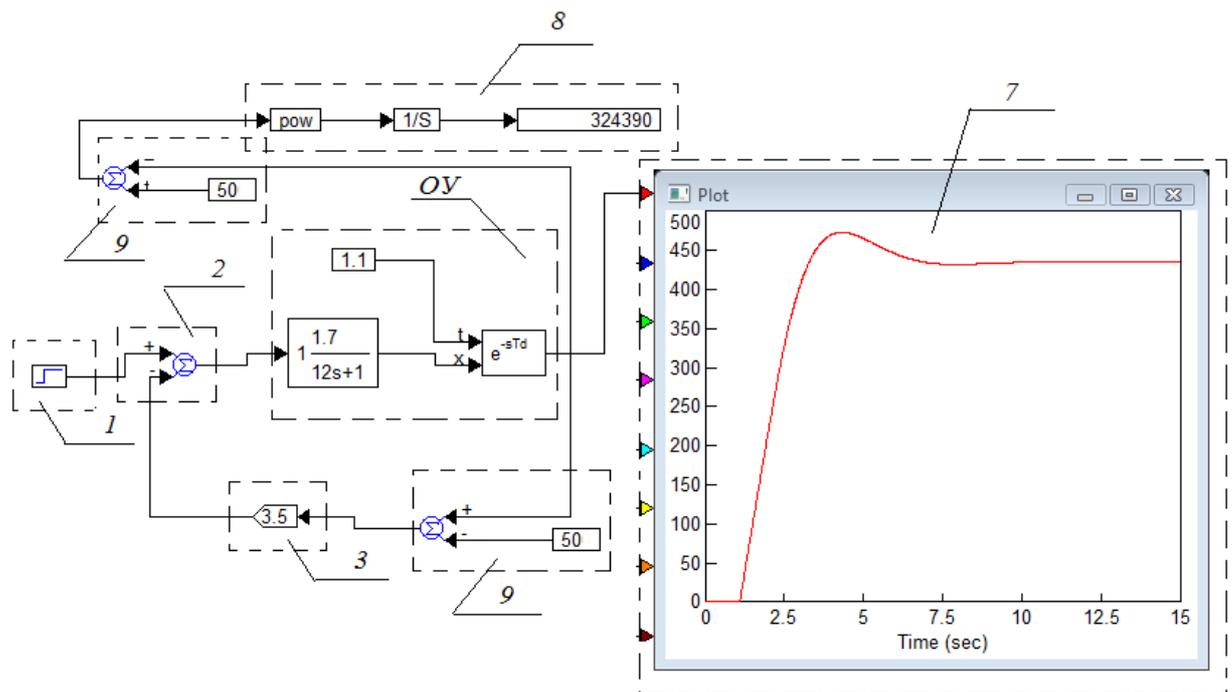
- структурную схему системы управления, переходный процесс которой имеет автоколебания (картинка из VisSim);
- таблицу с рассчитанными оптимальными коэффициентами П-, ПИ-, и ПИД-регуляторов;
- структурные схемы систем управления с П-, ПИ-, и ПИД-регуляторами с рассчитанными значениями коэффициентов (картинки из VisSim);
- расчёт степени затухания для каждого регулятора;
- вывод по результатам выполнения лабораторной работы.

Протокол выполнения лабораторной работы № 4 по дисциплине «Основы теории управления»			
<i>«Исследование качества переходных процессов замкнутой системы регулирования с обратной связью»</i>			
ФИО студента		Подпись преподавателя	
Группа		Дата отчета	
Дата выполнения		Оценка, баллы	

Цель работы: Изучение поведения замкнутой системы автоматического регулирования с обратной связью при изменении структуры управляющего устройства.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Реализовать в программном средстве VisSim структурную схему замкнутой системы регулирования с обратной связью с заданными параметрами входящих в нее элементов.



где 1 – блок формирования входного воздействия (единичный скачек);

2 – сумматор (для формирования отрицательного сигнала необходимо навести курсор на изменяемый знак и одновременно нажать Ctrl и правую кнопку мышки);

3 – передаточная функция управляющего устройства (k_1 – переменный параметр в ходе лабораторной работы);

ОУ – передаточная функция объекта управления (числовые значения коэффициентов выбираются согласно варианту из таблицы 1):

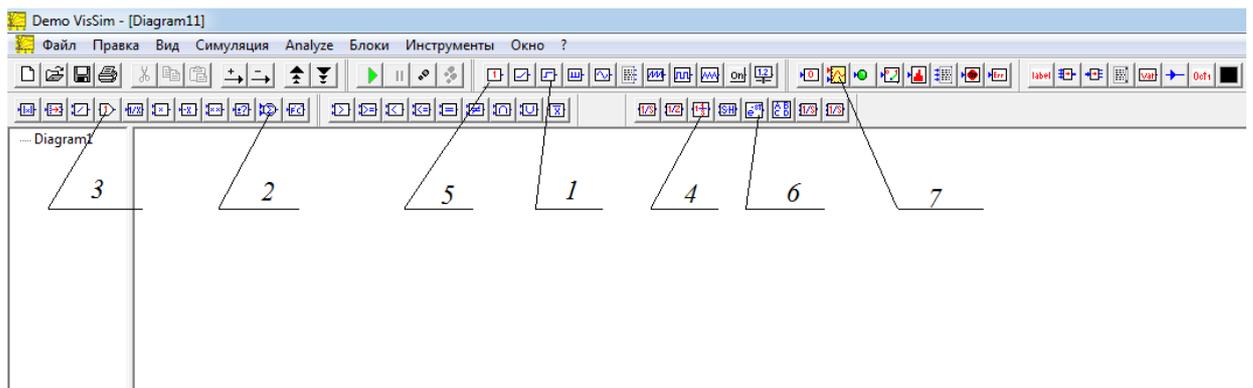
$$W_o = \frac{k}{2Ts^2 + Ts + 1} \cdot e^{-s\tau}$$

Таблица 1.

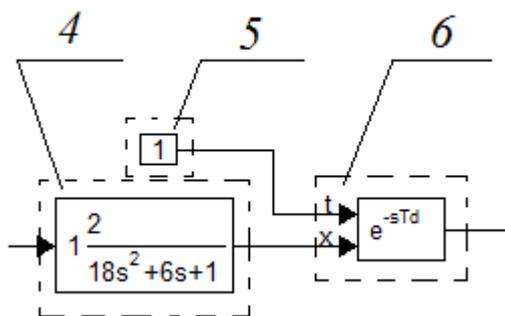
Номер варианта	к, коэффициент	Т, постоянная времени	τ, время запаздывания	Номер варианта	к, коэффициент	Т, постоянная времени	τ, время запаздывания	Номер варианта	к, коэффициент	Т, постоянная времени	τ, время запаздывания
1	2	23	2	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	5	19	3	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3
3	4	14	1,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	1,2	21	4	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	3,7	16	5	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	4,2	26	3,5	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	0,9	31	4,2	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	0,7	18	0,8	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	1,8	15	1,9	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	5,3	27	2,5	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	2,2	33	3,7	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	3,9	12	0,9	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

- 7 – блок реализации переходного процесса системы управления;
- 8 – система блоков для расчета численного значения среднеквадратичного критерия качества I_c ;
- 9 – блоки для формирования сигнала задания, который в ходе лабораторной работы не меняется и равен 50 для всех вариантов.

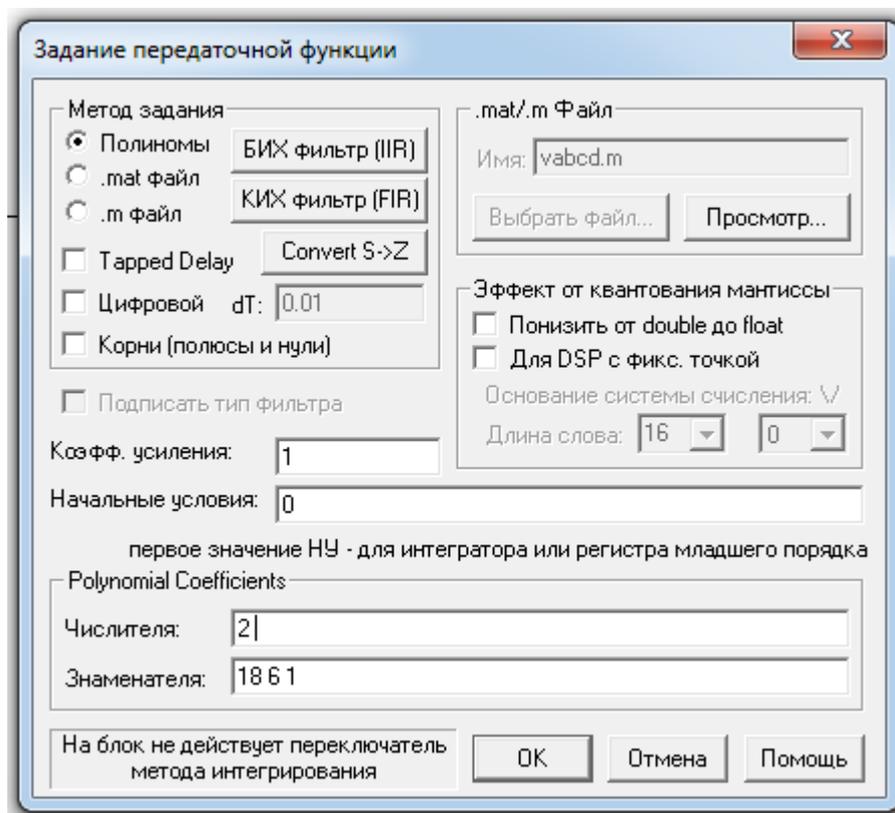
На рабочем поле программного средства VisSim из панели блоков выбираются необходимые для построения схемы управления элементы. Соединение блоков осуществляется с помощью курсора (курсор ведется от одного блока к другому с вычерчиванием зеленой линии).



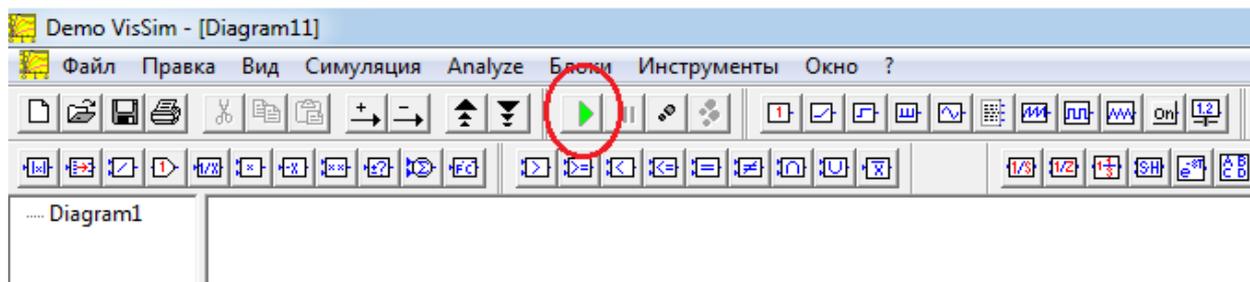
Формирование ОУ ведется следующим образом.



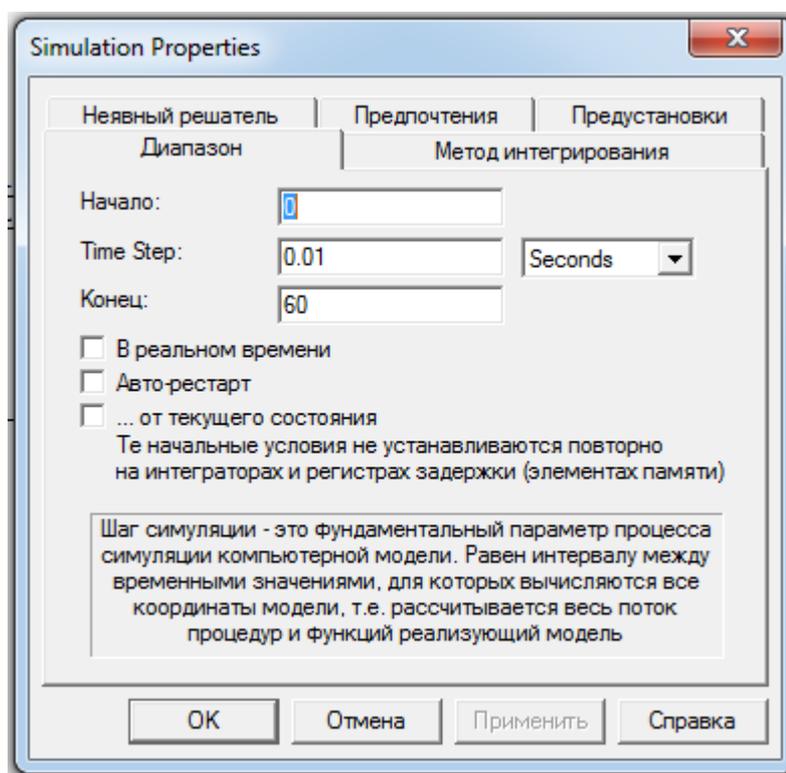
Чтобы задать параметры блока 4 по нему надо щелкнуть 2 раза мышью и в открывшемся окне ввести численные значения коэффициентов функции W_0 согласно варианту в графе числитель и знаменатель. Числа вводятся через пробел без знаков вычисления и переменной s .



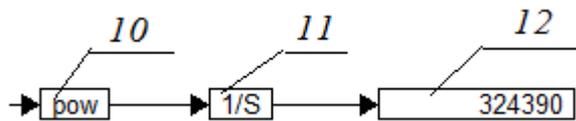
Чтобы запустить переходный процесс – нажать зеленую стрелку на панели блоков.



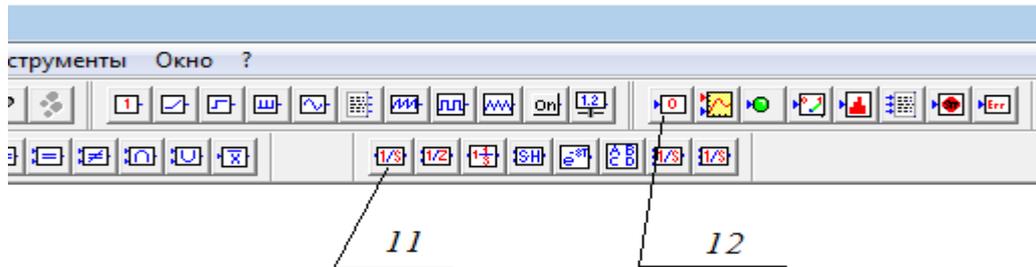
При изменении длительности переходного процесса в окне блока 7 (более 10) необходимо на панели блоков нажать «Симуляция» → «Настройки симуляции» → «Конец» и установить численное значение больше 10. При этом длительность переходного процесса должна быть одинаковой в ходе выполнения всей лабораторной работы.



2. Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок 3), определить при каком численном значении k_1 система соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества I_c , а, следовательно, наиболее эффективной работе системы. График переходного процесса должен быть **устойчивым**, то есть не иметь расходящихся колебаний. Блок 8 состоит из элементов:



где 10 – блок возведения в квадрат (блоки → арифметические → pow);
 11 – блок интегрирования;
 12 – блок вычисления численного значения среднеквадратичного критерия.



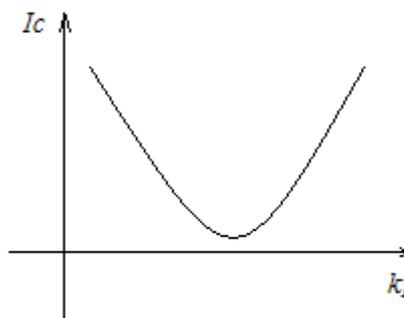
Такое структурирование блока 8 соответствует формуле среднеквадратичного критерия качества вида: $I_c = \int_0^{\infty} (y_3 - y)^2 dt \rightarrow \min$.

Заполнить таблицу 2 для значений среднеквадратичного показателя качества и построить график зависимости пропорционального коэффициента k_I от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

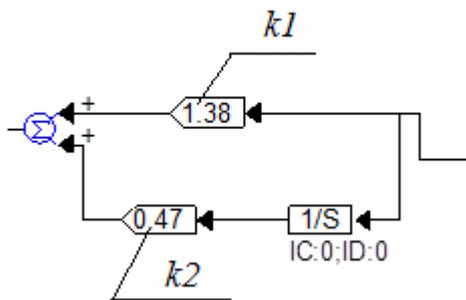
Таблица 2.

k_{Ii}												
I_{ci}												

При этом выполнение лабораторной работы и заполнения таблицы 2 ведется до тех пор, пока зависимость I_c от k_I не будет иметь вид параболы:



3. Следующий этап лабораторной работы – изменение структуры управляющего устройства (блок 3), который теперь реализует ПИ-закон управления:

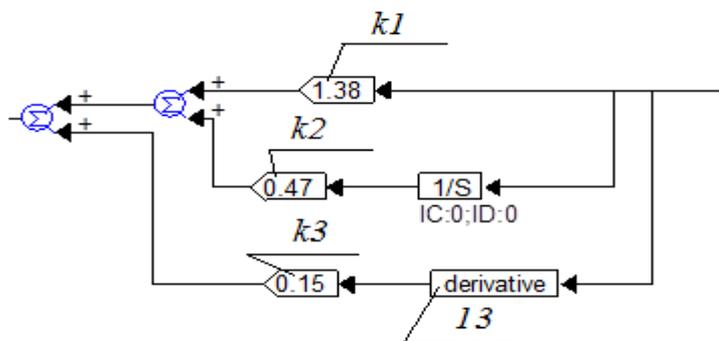


Численное значение коэффициента k_1 выбирается из п.2 данной лабораторной работы, которое соответствует минимуму I_c . Значение коэффициента k_2 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 3, по данным которой строится график зависимости интегрального коэффициента k_2 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 3.

k_{2i}											
I_{ci}											

4. Вновь меняется структура управляющего устройства (блок 3) и реализуется ПИД-закон управления:



Блок 13 служит для формирования дифференциальной составляющей регулятора и находится: блоки \rightarrow интеграторы \rightarrow derivative.

Коэффициенты k_1 и k_2 выбираются из п. 2, 3 данной лабораторной работы, которые соответствуют минимуму I_c . Значение коэффициента k_3 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 4, по данным которой строится график зависимости дифференциального коэффициента k_3 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 4.

k_{3i}											
I_{ci}											

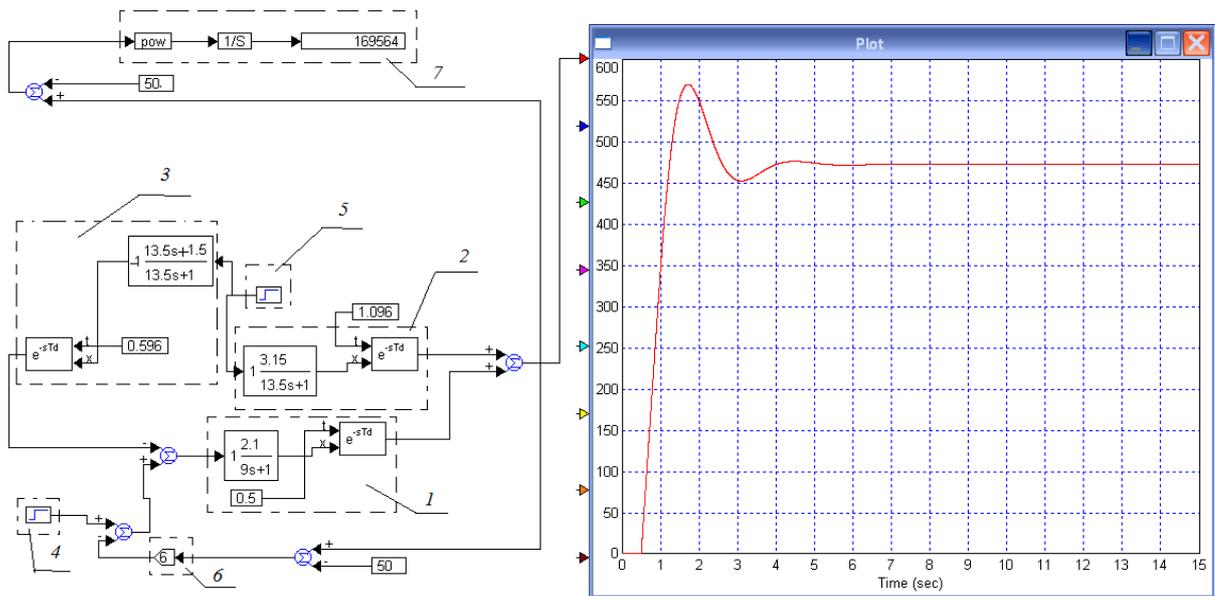
5. «Протокол выполнения лабораторной работы» должен содержать:
- шапку протокола;
 - цель работы;
 - передаточную функцию объекта управления с численными значениями коэффициентов, выбранных из таблицы 1;
 - структурную схему замкнутой системы регулирования с параметрами коэффициента пропорциональности k_1 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
 - таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_1 от I_c ;
 - структурную схему замкнутой системы регулирования с параметрами коэффициента k_2 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
 - таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_2 от I_c ;
 - структурную схему замкнутой системы регулирования с параметрами коэффициента k_3 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
 - таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_3 от I_c ;
 - выводы об эффективности той или иной системы автоматического управления (эффективность соответствует наименьшему значению критерия качества).

Протокол выполнения лабораторной работы № 5 по дисциплине «Основы теории управления»			
<i>«Исследование качества переходных процессов системы регулирования с компенсацией по возмущению»</i>			
ФИО студента		Подпись преподавателя	
Группа		Дата отчета	
Дата выполнения		Оценка, баллы	

Цель работы: Изучение поведения замкнутой системы регулирования с компенсацией по возмущению при изменении структуры управляющего устройства.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Реализовать в программном средстве VisSim структурную схему системы регулирования с компенсацией по возмущению с заданными параметрами входящих в нее элементов.



где 1 – передаточная функция объекта управления по основному контуру

$$W_o = \frac{k_o}{T_o s + 1} \cdot e^{-s\tau_o}$$

регулирования, параметры которой выбираются

из таблицы 1 согласно варианту (номер, указанный на системном блоке);

2 – передаточная функция объекта управления по каналу возмущения

$$W_B = \frac{k_6}{T_6 s + 1} \cdot e^{-s\tau_6}, \text{ параметры которой выбираются из таблицы 2}$$

согласно варианту (номер в групповом списке);

3 – W_k , передаточная функция динамического компенсатора,

рассчитанная по формуле: $W_k = -\frac{W_6}{W_0}$;

4 – входное воздействие, равное по амплитуде 1;

5 – величина возмущения, равного по амплитуде номеру варианта;

6 – передаточная функция управляющего устройства

(k_1 – переменный параметр);

7 – блок для вычисления значений среднеквадратичного показателя качества I_c .

Таблица 1.

Номер варианта	К.коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	К.коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	К.коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ , время запаздывания
1	3	19	4	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	2	16	3,9	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3
3	1,3	21	2,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	3,2	25	1,7	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	1,1	31	3,3	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	2,9	33	4,2	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	4	26	4,5	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	2,5	25	2,9	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	3,3	17	2,7	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	1,4	23	1,8	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	1,7	14	3	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	1,2	20	5,1	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

Таблица 2.

Номер варианта	$k_{в}$, коэффициент усиления	$T_{в}$, постоянная времени	$\tau_{в}$, время запаздывания	Номер варианта	$k_{в}$, коэффициент усиления	$T_{в}$, постоянная времени	$\tau_{в}$, время запаздывания	Номер варианта	$k_{в}$, коэффициент усиления	$T_{в}$, постоянная времени	$\tau_{в}$, время запаздывания
1	2	23	2	13	2,1	11	2,1	25	0,3	34	4,1
2	5	19	3	14	2	21	2,2	26	0,4	30	3,4
3	4	14	1,6	15	2,9	41	0,9	27	0,1	31	2,4
4	1,2	21	4	16	1,1	31	0,3	28	2,8	26	2,1
5	3,7	16	5	17	1,9	20	0,4	29	0,9	12	3,6
6	4,2	26	3,5	18	2,2	24	0,5	30	3,7	16	4
7	0,9	31	4,2	19	3,4	25	2,1	31	1,8	17	3
8	0,7	18	0,8	20	3	15	3,6	32	0,8	26	5,1
9	1,8	15	1,9	21	4	12	2,9	33	0,4	28	4,8
10	5,3	27	2,5	22	2,5	19	1,9	34	2,6	14	3,8
11	2,2	33	3,7	23	4,1	32	2,4	35	3	17	4,2
12	3,9	12	0,9	24	3,3	22	1,3	36	5	22	4,4

Принципы формирования структурных схем в программном средстве VisSim и задания коэффициентов в блоках – см. в л.р. № 1.

- Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок б), определить при каком численном значении k_1 система соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества I_c , а, следовательно, наиболее эффективной работе системы.

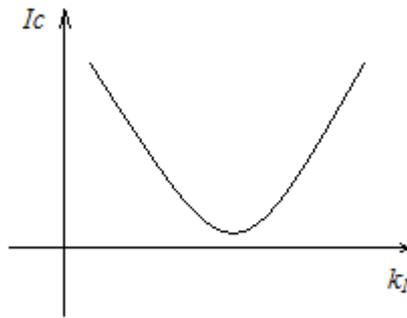
График переходного процесса должен быть **устойчивым**, то есть не иметь расходящихся колебаний.

Заполнить таблицу 3 для значений среднеквадратичного показателя качества и построить график зависимости пропорционального коэффициента k_1 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

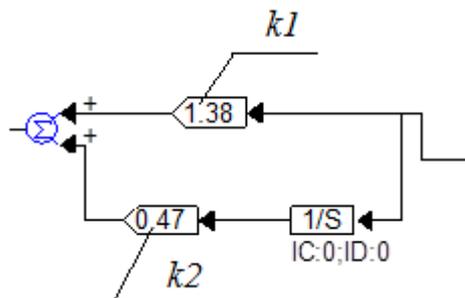
Таблица 3.

k_{1i}												
I_{ci}												

При этом выполнение лабораторной работы и заполнения таблицы 3 ведется до тех пор, пока зависимость I_c от k_1 не будет иметь вид параболы:



3. Следующий этап лабораторной работы – изменение структуры управляющего устройства (блок 6), который теперь реализует ПИ-закон управления:

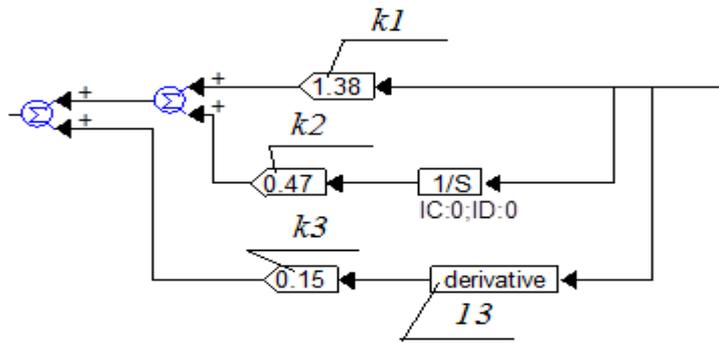


Численное значение коэффициента k_1 выбирается из п.2 данной лабораторной работы, которое соответствует минимуму I_c . Значение коэффициента k_2 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 4, по данным которой строится график зависимости интегрального коэффициента k_2 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 4.

k_{2i}												
I_{ci}												

4. Вновь меняется структура управляющего устройства (блок 6) и реализуется ПИД-закон управления:



Коэффициенты k_1 и k_2 выбираются из п. 2, 3 данной лабораторной работы, которые соответствуют минимуму I_c . Значение коэффициента k_3 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 5, по данным которой строится график зависимости дифференциального коэффициента k_3 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 5.

k_{3i}												
I_{ci}												

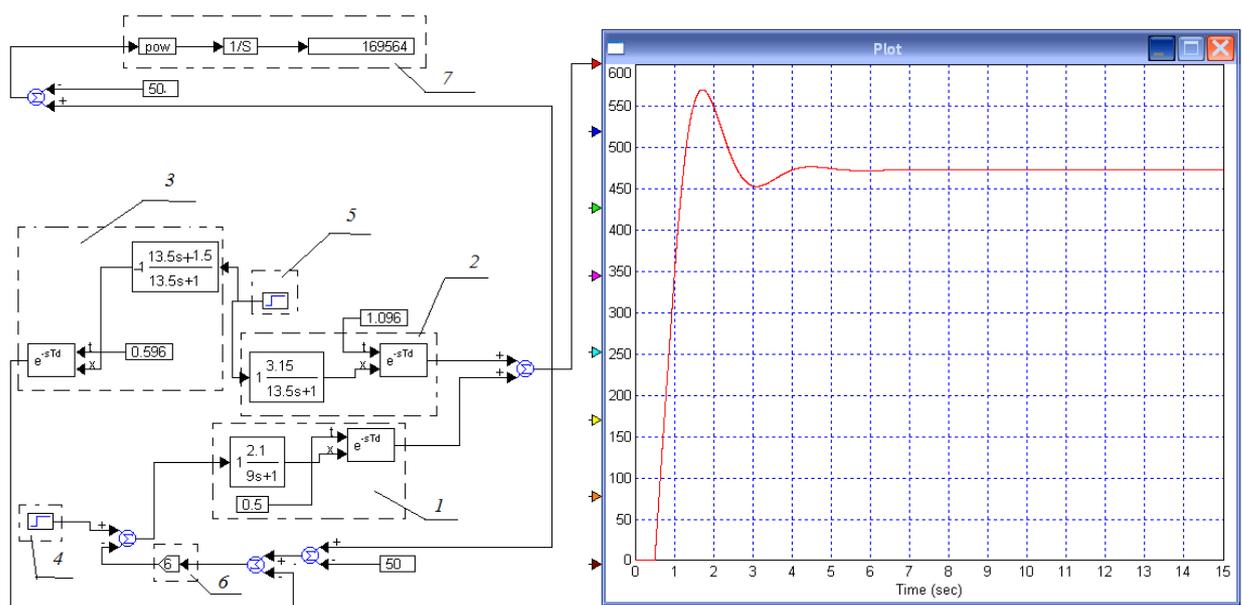
5. «Протокол выполнения лабораторной работы» должен содержать:
 - шапку протокола;
 - цель работы;
 - передаточные функции W_o, W_b, W_k , набранные в редакторе формул с численными значениями коэффициентов;
 - структурную схему системы регулирования с параметрами коэффициента пропорциональности k_1 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
 - таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_1 от I_c ;
 - структурную схему системы регулирования с параметрами коэффициента k_2 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
 - таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_2 от I_c ;
 - структурную схему системы регулирования с параметрами коэффициента k_3 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
 - таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_3 от I_c ;
 - выводы об эффективности той или иной системы автоматического управления (эффективность соответствует наименьшему значению критерия качества).

Протокол выполнения лабораторной работы № 6 по дисциплине «Основы теории управления» <i>«Исследование качества переходных процессов системы регулирования с компенсацией по отклонению»</i>			
ФИО студента		Подпись преподавателя	
Группа		Дата отчета	
Дата выполнения		Оценка, баллы	

Цель работы: Изучение поведения замкнутой системы регулирования с компенсацией по отклонению при изменении структуры управляющего устройства.

Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Реализовать в программном средстве VisSim структурную схему системы регулирования с компенсацией по отклонению с заданными параметрами входящих в нее элементов.



где 1 – передаточная функция объекта управления по основному контуру

регулирования $W_o = \frac{k_o}{T_o s + 1} \cdot e^{-s\tau_o}$, параметры которой выбираются из таблицы 1 согласно варианту (номер, указанный на системном блоке);

2 – передаточная функция объекта управления по каналу возмущения

$$W_B = \frac{k_\theta}{T_\theta s + 1} \cdot e^{-s\tau_\theta}, \text{ параметры которой выбираются из таблицы 2}$$

согласно варианту (номер, указанный на системном блоке);

3 – W_K , передаточная функция динамического компенсатора,

$$\text{рассчитанная по формуле: } W_K = -\frac{W_\theta}{W_o \cdot R};$$

4 – входное воздействие, равное по амплитуде 1;

5 – величина возмущения, равного по амплитуде номеру варианта;

6 – передаточная функция управляющего устройства

(k_I – переменный параметр);

7 – блок для вычисления значений среднеквадратичного показателя качества I_c .

Таблица 1.

Номер варианта	К.коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	К.коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ , время запаздывания	Номер варианта	К.коэффициент усиления	T, постоянная времени	τ , время запаздывания
1	3	19	4	13	3,1	24	1,5	25	0,5	21	1,1
2	2	16	3,9	14	2,7	31	2,3	26	2,7	25	1,3
3	1,3	21	2,6	15	1,5	16	0,5	27	3	32	0,2
4	3,2	25	1,7	16	1,8	20	0,8	28	2	15	0,4
5	1,1	31	3,3	17	3	14	2,7	29	1,6	19	2,1
6	2,9	33	4,2	18	4,2	18	3,6	30	3,1	27	2,4
7	4	26	4,5	19	2,9	27	5,1	31	2,3	22	1,7
8	2,5	25	2,9	20	1,2	23	4,6	32	1,2	16	1,6
9	3,3	17	2,7	21	2,2	36	0,3	33	1,3	35	2,5
10	1,4	23	1,8	22	1,3	17	0,7	34	1,8	31	3,1
11	1,7	14	3	23	0,9	11	1,2	35	2,4	21	3,3
12	1,2	20	5,1	24	1,6	34	1,6	36	0,7	13	4

Таблица 2.

Номер варианта	$K_{\text{в}}$, коэффициент усиления	$T_{\text{в}}$, постоянная времени	$\tau_{\text{в}}$, время запаздывания	Номер варианта	$K_{\text{в}}$, коэффициент усиления	$T_{\text{в}}$, постоянная времени	$\tau_{\text{в}}$, время запаздывания	Номер варианта	$K_{\text{в}}$, коэффициент усиления	$T_{\text{в}}$, постоянная времени	$\tau_{\text{в}}$, время запаздывания
1	2	23	2	13	2,1	11	2,1	25	0,3	34	4,1
2	5	19	3	14	2	21	2,2	26	0,4	30	3,4
3	4	14	1,6	15	2,9	41	0,9	27	0,1	31	2,4
4	1,2	21	4	16	1,1	31	0,3	28	2,8	26	2,1
5	3,7	16	5	17	1,9	20	0,4	29	0,9	12	3,6
6	4,2	26	3,5	18	2,2	24	0,5	30	3,7	16	4
7	0,9	31	4,2	19	3,4	25	2,1	31	1,8	17	3
8	0,7	18	0,8	20	3	15	3,6	32	0,8	26	5,1
9	1,8	15	1,9	21	4	12	2,9	33	0,4	28	4,8
10	5,3	27	2,5	22	2,5	19	1,9	34	2,6	14	3,8
11	2,2	33	3,7	23	4,1	32	2,4	35	3	17	4,2
12	3,9	12	0,9	24	3,3	22	1,3	36	5	22	4,4

Принципы формирования структурных схем в программном средстве VisSim и задания коэффициентов в блоках – см. в л.р. № 1.

- Изменяя численное значение коэффициента пропорциональности k_1 в управляющем устройстве (блок б), определить при каком численном значении k_1 система соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества I_c , а, следовательно, наиболее эффективной работе системы.

При этом **не забываем** пересчитывать численные значения знаменателя в передаточной функции динамического компенсатора W_k .

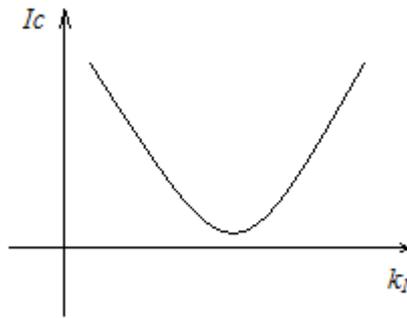
График переходного процесса должен быть **устойчивым**, то есть не иметь расходящихся колебаний.

Заполнить таблицу 3 для значений среднеквадратичного показателя качества и построить график зависимости пропорционального коэффициента k_1 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

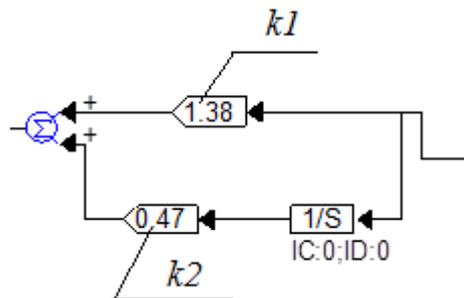
Таблица 3.

k_{1i}												
I_{ci}												

При этом выполнение лабораторной работы и заполнения таблицы 3 ведется до тех пор, пока зависимость I_c от k_1 не будет иметь вид параболы:



3. Следующий этап лабораторной работы – изменение структуры управляющего устройства (блок б), который теперь реализует ПИ-закон управления:



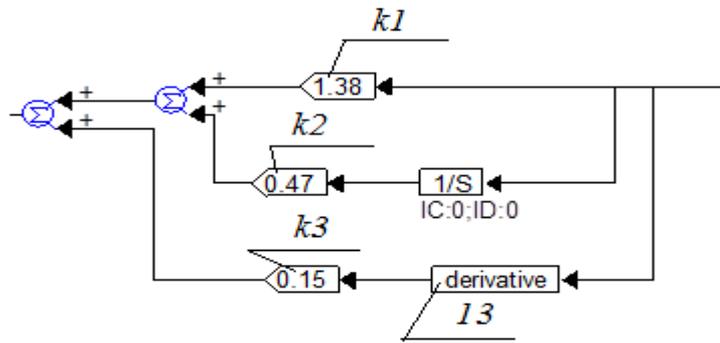
В блоке 3 рассчитывается новая формула W_k с учетом новой передаточной функции управляющего устройства и **при изменении численных значений коэффициента k_2 знаменатель функции W_k тоже меняется.**

Численное значение коэффициента k_1 выбирается из п.2 данной лабораторной работы, которое соответствует минимуму I_c . Значение коэффициента k_2 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 4, по данным которой строится график зависимости интегрального коэффициента k_2 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 4.

k_{2i}												
I_{ci}												

4. Вновь меняется структура управляющего устройства (блок б) и реализуется ПИД-закон управления:



В блоке 3 рассчитывается новая формула W_k с учетом новой передаточной функции управляющего устройства и **при изменении численных значений коэффициента k_3 знаменатель функции W_k тоже меняется.**

Коэффициенты k_1 и k_2 выбираются из п. 2, 3 данной лабораторной работы, которые соответствуют минимуму I_c . Значение коэффициента k_3 меняется, пока не будет найден новый минимум I_c . Используемые значения коэффициента и среднеквадратичного критерия качества заносятся в таблицу 5, по данным которой строится график зависимости дифференциального коэффициента k_3 от среднеквадратичного показателя качества I_c (в Excel).

Таблица 5.

k_{3i}												
I_{ci}												

5. «Протокол выполнения лабораторной работы» должен содержать:
- шапку протокола;
 - цель работы;
 - передаточные функции W_o , W_b , W_k , набранные в редакторе формул с численными значениями коэффициентов (причем последняя меняется для каждого типа управляющего устройства);
 - структурную схему системы регулирования с параметрами коэффициента пропорциональности k_1 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
 - таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_1 от I_c ;
 - структурную схему системы регулирования с параметрами коэффициента k_2 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;
 - таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_2 от I_c ;
 - структурную схему системы регулирования с параметрами коэффициента k_3 , численное значение которого соответствует минимуму среднеквадратичного критерия качества;

- таблицу экспериментальных данных и график зависимости k_3 от I_c ;
- выводы об эффективности той или иной системы автоматического управления (эффективность соответствует наименьшему значению критерия качества).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рабочая программа дисциплины (модуля) «Основы теории управления», разработанная в соответствии с ФГО ВО по направлению подготовки 09.03.01 ИНФОРМАТИКА И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА (уровень бакалавриата) (приказ Минобрнауки России от 12.01.2016 г. №5): 2017-2018_09_03_01-15-1-3933.
2. Сенигов П.Н. Теория автоматического управления: Конспект лекций. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001 - 93с.
3. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования: Справочное пособие/ А.С. Ключев, А.Т. Лебедев, С.А. Ключев, А.Г. товарнов; Под. ред . А.С. Ключева. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.: ил.
4. Ротач В.Я. Расчет динамики промышленных автоматических систем регулирования. М.: «Энергия». 1986. – 440 с., с ил.
5. Клиначев Н.В. Моделирование систем в программе VisSim. Справочная система. – Челябинск: ЮУрГУ, 2001.

Электронное учебное издание

Людмила Ивановна **Медведева**

ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ

Учебно-методическое пособие

Электронное издание сетевого распространения

Редактор Матвеева Н.И.

Темплан 2019 г. Поз. № 49.

Подписано к использованию 02.07.2019. Формат 60x84 1/16.

Гарнитура Times. Усл. печ. л. 5,13.

Волгоградский государственный технический университет.

400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28, корп. 1.

ВПИ (филиал) ВолгГТУ.

404121, г. Волжский, ул. Энгельса, 42а.