

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра автоматизированных систем управления производством

Ю. А. Сидоренко, Е. Е. Мякинник

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области сельского хозяйства в качестве
практикума для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по специальности 1-53 01 01-09 Автоматизация
технологических процессов и производств (сельское хозяйство)*

Минск
БГАТУ
2012

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7
С34

Рецензенты: кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники Учреждения образования «Белорусский государственный технологический университет»; заведующий лабораторией информационно-управляющих систем в сельском хозяйстве РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», доктор технических наук *И. И. Гируцкий*

Сидоренко, Ю. А.

С34 Теория автоматического управления : практикум / Ю. А. Сидоренко, Е. Е. Мякинник. – Минск : БГАТУ, 2012. – 132 с.

ISBN 978-985-519-491-1.

УДК 681.5(07)
ББК 32.965я7

ISBN 978-985-519-491-1

© БГАТУ, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА О ПРАКТИЧЕСКОМ ЗАНЯТИИ	6
ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ И КУРСОВОЙ РАБОТЕ	8
Тема 1. УСТРОЙСТВО, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	11
Тема 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	17
Тема 3. ЗАКОНЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	26
Тема 4. ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	30
Тема 5. УСТОЙЧИВОСТЬ И ЗАПАСЫ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ	35
Тема 6. СТАТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО УПРАВЛЯЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ	46
Тема 7. СТАТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ВОЗМУЩАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ	48

Тема 8. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ	51
Тема 9. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА СИНТЕЗА ПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭВМ	57
ЗАДАНИЯ К КУРСОВЫМ РАБОТАМ	64
ЛИТЕРАТУРА	68
ПРИЛОЖЕНИЯ	69

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Теория автоматического управления» является частью технической кибернетики, посвященной принципам действия, построения и методам исследования систем автоматического управления.

Предлагаемый практикум содержит правила оформления отчета о практическом занятии, девять тем практических занятий с краткими теоретическими сведениями для выполнения каждой темы и примером выполнения темы.

В практикуме формулируются цель курсовой работы, задания к курсовой работе и правила оформления курсовой работы.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА О ПРАКТИЧЕСКОМ ЗАНЯТИИ

Отчет выполняется на одной стороне листа формата А4. Допускается выполнение отчета в специальных тетрадах.

Отчет излагается в следующей последовательности: титульный лист, цель занятия, задание, результаты выполнения занятия.

Пример оформления титульного листа приведен ниже.

Схемы должны быть выполнены с соблюдением правил. Под ними должны быть даны номер рисунка, полное название рисунка и при необходимости расшифровка обозначений.

Таблицы приводятся с номером таблицы и названием над таблицей, обозначениями переменных и их размерностью.

Графики выполняются в масштабе, обеспечивающем наглядность и достоверность информации. Оси координат должны быть снабжены обозначениями переменных, размерностью переменных и шкалой. На графике должны быть нанесены точки, по которым он строится. Под графиком должны быть даны номер рисунка и полные названия графиков.

Формулы и зависимости приводятся в общем виде и с численными значениями параметров и результатом расчета (если он выполняется) с размерностью полученных величин. Под формулой или зависимостью дается расшифровка обозначений, если эти обозначения в отчете встречаются впервые.

Отчет о практическом занятии представляется преподавателю и защищается в конце занятия.

В исключительных случаях защита допускается в начале следующего занятия или на консультации.

Пример оформления титульного листа

Белорусский государственный аграрный технический университет

Кафедра АСУП

группа 4а

Отчет о выполнении темы практического занятия №1 «Устройство, функциональный состав и принцип действия систем автоматического регулирования»

Исполнитель

В. И. Петров

20.09.2011г.

Руководитель

Ю. А. Сидоренко

20.09.2011

ОБЩИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ ЗАНЯТИЯМ И КУРСОВОЙ РАБОТЕ

Управление каким-либо объектом – это процесс воздействия на него с целью обеспечения требуемого течения процессов в объекте или требуемого изменения его состояния.

Управление, осуществляемое без участия человека, называется *автоматическим управлением*.

Под *объектом управления (ОУ)*, в общем случае, понимают совокупность взаимосвязанных технических средств и биологических объектов, которыми необходимо управлять для достижения цели.

В частном случае ОУ может содержать только технические устройства или только биологические объекты.

Техническое устройство, с помощью которого осуществляется автоматическое управление объектом, называется *управляющим устройством (УУ)*.

Совокупность объекта управления и управляющего устройства образует *систему автоматического управления (САУ)*.

Параметр ОУ, которым управляют, называется *управляемой величиной*.

Воздействие, которое прикладывается к ОУ со стороны УУ для изменения управляемой величины, называется *управляющим воздействием на объект*.

На состояние ОУ и УУ влияют воздействия, которые вызывают изменение управляемой величины, мешая процессу управления. Такие воздействия называют *возмущающими воздействиями*.

На УУ подают (программируют) воздействие, которое определяет цель управления. Такое воздействие называется *управляющим или задающим воздействием на систему*.

Любое управление осуществляется в соответствии с двумя фундаментальными принципами – это принцип разомкнутого управле-

ния и принцип замкнутого управления по отклонению, который также называют принципом управления по ошибке или принципом управления по отклонению.

В системах разомкнутого управления (при формировании управляющего воздействия на объект) отклонение управляемой величины от требуемого значения не измеряется, т.е. нет контроля за состоянием объекта. Возможны два варианта такого управления.

В первом варианте управление осуществляется только в соответствии с задающим воздействием. В этом случае результат управления также зависит от влияния возмущающих воздействий и неустойчивости параметров системы. Такое управление возможно, если не учитывать влияние этих факторов (требования к точности управления невысокие).

Во втором варианте управляющее воздействие на объект формируется в зависимости от одного или нескольких возмущающих воздействий. Для этого они измеряются. Такой принцип управления называют управлением по возмущению, или принципом компенсации возмущающих воздействий. Поскольку учесть все возмущающие воздействия невозможно, то результат управления также зависит от влияния неучтенных воздействий и неустойчивости параметров системы. Такое управление возможно, если требования точности управления позволяют не учитывать влияние этих факторов.

В системах с принципом замкнутого управления (по ошибке) измеряется значение управляемой величины, результат измерения сравнивается с задающим воздействием и, в зависимости от результата сравнения (ошибки), формируется управляющее воздействие на объект. Принцип управления по отклонению обеспечивает наиболее точное управление.

Изменение управляемой величины отстает во времени от возмущающего воздействия, вызывающего ошибку, что снижает качество управления в системах, работающих по отклонению. Поэтому применяется также комбинированное управление по возмущению и ошибке.

Частным случаем САУ являются системы автоматического регулирования (САР). САР – это системы, работающие по ошибке или с комбинированным управлением, в которых регулируемая величина стабилизируется, изменяется по заданной программе или в соответствии с заранее неизвестным задающим воздействием. Задающее

воздействие на САР подается извне через задающее устройство (задачик) и определяется алгоритмом ее функционирования – требуемым изменением регулируемой величины. В соответствии с алгоритмом функционирования САР делятся на системы стабилизации, системы программного управления и следящие системы, когда задающее воздействие заранее неизвестно и регулируемая величина должна следить за изменением задающего воздействия. При рассмотрении САР термин «управление» иногда заменяют термином «регулирование» (регулируемая величина, регулирующее воздействие на объект), вместо термина «управляющее устройство» используют термин «регулятор».

В дальнейшем мы будем рассматривать САР как частный случай систем автоматического управления, нашедший широкое применение в сельскохозяйственном производстве и других областях деятельности человека.

Целью рассмотрения системы автоматического управления может быть решение одной из двух задач – задачи анализа системы или задачи ее синтеза. В первом случае дается система, включая значения параметров, и требуется определить ее свойства. Во втором случае, наоборот, задаются свойства, которыми должна обладать система, т.е. требования к ней, и необходимо создать систему, удовлетворяющую этим требованиям. Задача синтеза имеет неоднозначное решение и намного сложнее задачи анализа.

В самом общем виде порядок исследования САР в обоих случаях включает математическое описание системы, исследование установившихся и переходных ее режимов.

Анализ является одним из приемов синтеза и проводится для проверки соответствия системы предъявляемым к ней требованиям. В обязательном порядке анализ необходимо проводить после упрощенного инженерного выбора структуры и параметров регулятора, а также после выбора какого-либо типового решения, опробованного при автоматизации сходного по своим свойствам и условиям функционирования объекта.

Тема 1.

УСТРОЙСТВО, ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель: изучение принципа построения общего функционального состава и принципа действия систем автоматического регулирования (САР).

Задание

По заданной схеме:

- 1) дать характеристику объекта управления;
- 2) описать устройства, входящие в САР;
- 3) составить функциональную схему САР;
- 4) описать работу САР;
- 5) сделать выводы о принципе управления и виде САР.

В характеристике объекта управления (ОУ) необходимо указать, что является ОУ, регулируемой величиной, целью управления, управляющим воздействием на объект, возмущающими воздействиями и какое возмущающее воздействие принято в качестве основного.

При описании устройства САР следует перечислить все элементы системы, описать связи между элементами, определить функцию, выполняемую каждым элементом, составить функциональную схему. Затем следует описать работу системы.

Теоретические сведения

Функциональная схема системы – это наглядное графическое изображение системы в виде взаимосвязанных элементов, выполняющих определенную функцию.

Элементы функциональной схемы изображаются прямоугольниками, а связи между ними указываются линиями со стрелками, соответствующими направлению прохождения сигнала. Вместо термина «сигнал» используют также термины «переменная», «входное воздействие» и «выходная величина».

Наименование функционального элемента в сокращенной форме указывается внутри соответствующего прямоугольника. Над линиями связи указывают обозначение сигнала. Под схемой или в тексте сокращения и обозначения расшифровываются.

При составлении функциональной схемы следует руководствоваться общим функциональным составом САР. САР состоит из объекта управления и регулятора. Регулятор состоит из измерительного преобразователя (датчика), задающего устройства (задатчика), усилительно-преобразовательного устройства, которым может быть регулирующей блок, исполнительного устройства и регулирующего органа.

В каждой конкретной системе указанные функциональные элементы представлены конкретными устройствами. Некоторые функциональные элементы в системе могут отсутствовать. В систему могут быть введены дополнительные устройства, такие как механизмы передачи движения, промежуточные преобразователи, устройства местной обратной связи и т.д.

Для наглядности изучения устройства, функционального состава, работы и принципа управления САР изложение материала ведется на примере системы, реализованной на непрерывных устройствах. Однако в настоящее время перспективным является реализация регулирующих блоков на базе микропроцессорных контроллеров. Поэтому параллельно приведен пример такой реализации (рис. 2).

На рисунке 1 приведена схема САР температуры в климатической камере, выполненная на непрерывных устройствах.

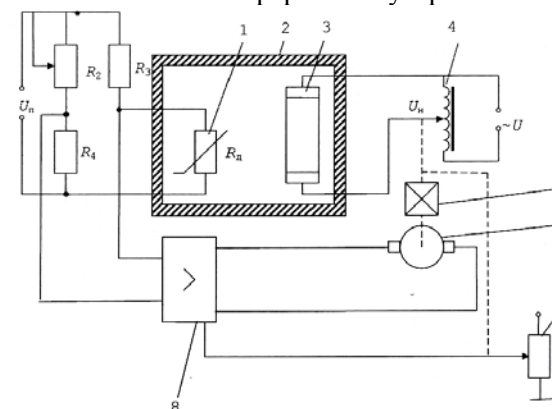


Рис. 1. Схема системы автоматического регулирования температуры в климатической камере: 1 – датчик (термометр сопротивления); 2 – климатическая камера; 3 – электрический нагреватель; 4 – автотрансформатор; 5 – редуктор; 6 – потенциометр местной обратной связи; 7 – электродвигатель; 8 – дифференциальный усилитель

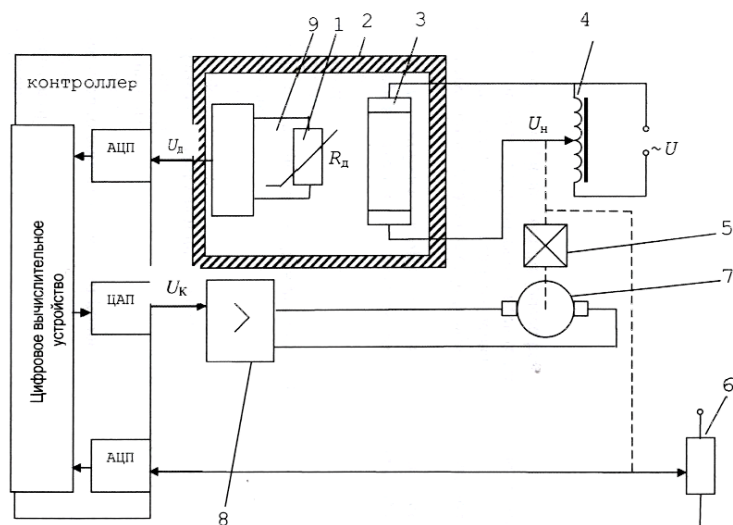


Рис. 2. Схема системы автоматического регулирования температуры в климатической камере с регулирующим блоком на базе микропроцессорного контроллера: АЦП – аналогово-цифровой преобразователь; ЦАП – цифро-аналоговый преобразователь; 1 – датчик (термометр сопротивления); 2 – климатическая камера; 3 – электрический нагреватель; 4 – автотрансформатор; 5 – редуктор; 6 – потенциометр местной обратной связи; 7 – электродвигатель; 8 – усилитель; 9 – блок, преобразующий омическое сопротивление термометра сопротивления в стандартный сигнал (токовый или потенциальный) на входе в контроллер; U_d – стандартный сигнал на выходе преобразователя 9 датчика; U_k – сигнал на входе в контроллер

САР температуры в климатической камере состоит из объекта управления и регулятора.

Объектом управления (ОУ) рассматриваемой САР является климатическая камера 2 с нагревательным элементом 3. Регулируемой величиной является температура θ внутри камеры. Целью управления является поддержание температуры в климатической камере на постоянном заданном уровне. Управляющим воздействием на ОУ является напряжение U_n , подаваемое на нагревательный элемент 3. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры θ_n наружного воздуха от расчетного номинального значения. Дополнительными возмущающими воздействиями могут быть, например, изменения напряжения питания моста U_n и трансформатора U .

Датчиком (Д) является термометр сопротивления R_d 1. Входной сигнал для термометра сопротивления – температура θ в камере, выходной сигнал – величина сопротивления R_d термометра.

Задатчиком является переменное сопротивление R_2 . Задающий сигнал – величина сопротивления R_2 , который в определенном масштабе соответствует заданному значению температуры θ_3 в камере.

Сравнивающее устройство (СУ) – мостовая измерительная схема (М), образованная сопротивлениями R_d , R_2 , R_3 и R_4 . Для нее входными сигналами являются величины сопротивлений R_d и R_2 , выходным сигналом является напряжение U_m разбаланса моста, которое в определенном масштабе соответствует ошибке регулирования.

Дифференциальный усилитель (ДУ) выполняет функции устройства сравнения (вычитания) входных сигналов и усиления их разности. На вход усилителя поступают напряжение U_m разбаланса моста и напряжение U_{oc} устройства местной обратной связи. Выходной сигнал усилителя – напряжение U_y , подаваемое на электродвигатель 7.

Исполнительное устройство представляет из себя исполнительный механизм, который состоит из электродвигателя (Дв) 7 и редуктора (Р) 5. Входной сигнал для электродвигателя – напряжение U_y , выходной сигнал – угол φ_d поворота вала электродвигателя. Входной сигнал для редуктора – φ_d , выходной сигнал – угол φ_p поворота вала редуктора.

Устройство местной обратной связи (УОС) выполнено в виде потенциометрического датчика перемещения 6, подвижный контакт которого механически связан с валом редуктора. Входной сигнал УОС – угол φ_p , выходной сигнал – напряжение U_{oc} .

Регулирующим органом (РО) является автотрансформатор (АТ) 4. Входной сигнал – угол поворота φ_p , выходной сигнал – напряжение U_n , подаваемое на нагревательный элемент 3 объекта управления.

На основании выше изложенного составлена функциональная схема системы, которая приведена на рисунке 3.

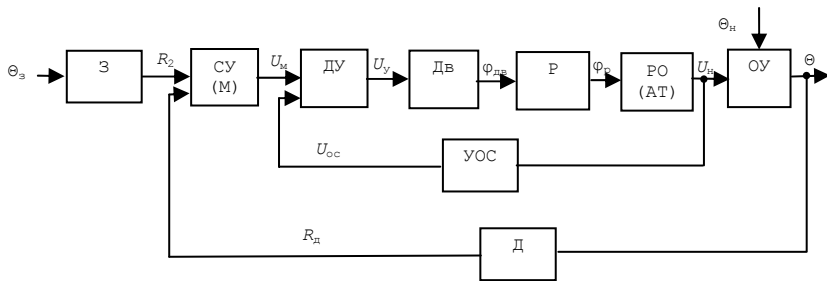


Рис. 3. Функциональная схема САР температуры в климатической камере

Система работает следующим образом. В установившемся режиме работы при равенстве температуры θ в камере с заданной θ_3 выходное напряжение U_m равно 0. При отклонении температуры в камере от заданной, например, при изменении температуры наружного воздуха θ_n сопротивление R_d вычитается из напряжения U_m разбаланса моста. Усилитель усиливает разность напряжений U_m и U_{oc} . За счет местной обратной связи обеспечивается пропорциональная зависимость между напряжением U_m и углом φ_p поворота вала редуктора. Поэтому изменение напряжения U_k на нагревательном элементе (управляющее воздействие на объект) пропорционально величине отклонения температуры Θ в камере от заданного Θ_3 значения. В результате температура в камере возвращается к заданному значению.

При непрерывном изменении наружной температуры процесс регулирования идет непрерывно. Если наружная температура установится, то при правильно подобранных параметрах регулятора процесс регулирования через некоторое время закончится и вся система придет в новое установившееся состояние.

В результате рассмотрения устройства и работы системы можно сделать следующие выводы.

В системе реализован принцип управления по отклонению (по ошибке). Система является стабилизирующей.

Примечание. Система могла бы работать и без УОС. При этом напряжение U_n изменялось бы до тех пор, пока температура Θ в камере не стала бы равна заданной Θ_3 . Качество системы при этом было бы другое.

С целью более полного изложения материала к выполнению вариантов практических занятий в «Примечаниях» будет коротко рассмотрен вариант исполнения системы без УОС.

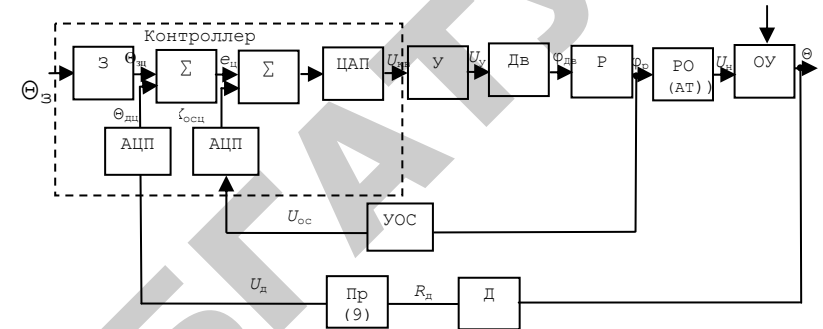


Рис. 4. Функциональная схема САР температуры в климатической камере с регулирующим блоком на базе микропроцессорного контроллера:

Σ – блоки сравнения; Θ_3 – цифровой сигнал заданной температуры; $\Theta_{дц}$ – цифровой сигнал датчика; $e_{дц}$ – цифровой сигнал ошибки; $X_{осц}$ – цифровой сигнал местной обратной связи; U_k – напряжение на выходе контроллера

Контрольные вопросы

1. Дайте определения объекта управления, управляющего устройства и системы автоматического управления.
2. Назовите фундаментальные принципы автоматического управления и дайте их определения.
3. Дайте определение системы автоматического регулирования.
4. Что включает в себе задача анализа САР?
5. В чем заключается задача синтеза САР?
6. Изложите правила построения функциональных схем.

Тема 2.
**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ
 И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ СИСТЕМ
 АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ**

Цель: получение навыков математического описания САР, составление структурных схем САР.

Задание

1. Получить передаточные функции устройств, входящих в САР.
2. Составить структурную схему САР.

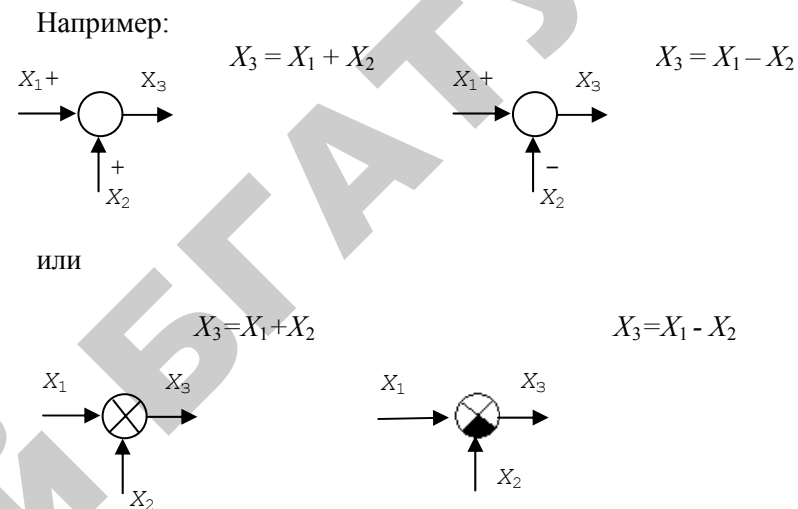
Теоретические сведения

Структурной схемой называется наглядное графическое изображение математической модели (математического описания) системы.

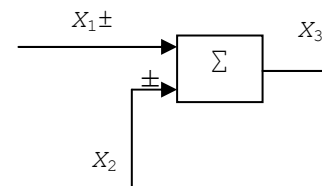
При математическом описании систему разбивают на отдельные звенья направленного действия, передающие воздействия только в одном направлении со входа на выход.

На структурной схеме каждое звено изображается прямоугольником, внутри которого записывается математическое описание звена. Связи между звеньями структурной схемы изображаются линиями со стрелками, соответствующими направлению прохождения сигналов. Над линиями ставятся обозначения сигналов.

Элементы, осуществляющие сложения и вычитание сигналов на структурной схеме, изображают в виде окружностей. Над стрелкой проставляется знак сигнала. Иногда окружность разбивают на секторы. Тогда сектор, к которому подходит вычитаемый сигнал, затеняется.



Кроме того, устройства сравнения (блоки сравнения) обозначают в виде сумматора:



Математическое описание звеньев составляют на основании законов той области знаний, к которой относится рассматриваемое звено. Если звено описывается линейным дифференциальным уравнением, то его называют нелинейным. Если звено описывается нелинейным уравнением, то его называют линейным. Системы, которые содержат только линейные звенья, являются линейными. Если система содержит хотя бы одно нелинейное звено, то она является нелинейной. Линейное описание звеньев и систем является приближенным и описывает их поведение в отклонениях от установившегося режима.

В автоматике при описании линейных звеньев принято пользоваться не непосредственно дифференциальными уравнениями, а их передаточными функциями, что значительно удобнее.

Передаточной функцией называется отношение изображения Лапласа входной величины звена или системы при нулевых начальных условиях.

Формально для линейных дифференциальных уравнений изображение Лапласа можно получить заменой в уравнении оператора дифференцирования d/dt на комплексную переменную $p = c + j\omega$.

На структурных схемах внутри прямоугольника, изображающего линейное звено, записывается его передаточная функция.

Составим для примера структурную схему САР температуры в климатической камере.

Для этого получим передаточные функции всех элементов системы.

1. Уравнение климатической камеры как объекта управления:

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 U_n + K_2 \theta_n.$$

Изображение Лапласа этого уравнения:

$$T_1 p \theta(p) + \theta(p) = K_1 U_n(p) + K_2 \theta_n(p).$$

Если к звену приложено несколько воздействий, то составляются передаточные функции отдельно по каждому воздействию. При этом остальные воздействия полагают равными 0. Согласно принципу суперпозиции изменение выходной величины такого звена равно сумме изменений выходных величин по каждому воздействию.

В нашем случае передаточная функция климатической камеры по управляющему воздействию U_n :

$$W_y(p) = \frac{\theta(p)}{U_n(p)} = \frac{K_1}{T_1 p + 1}.$$

Передаточная функция климатической камеры по возмущающему воздействию θ_n :

$$W_f(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_n(p)} = \frac{K_2}{T_1 p + 1}.$$

Аналогичным образом получим передаточные функции остальных элементов системы.

2. Датчик температуры Д:

$$T_d \frac{dR_d}{dt} + R_d = K_d \theta;$$

$$T_d p R_d(p) + R_d(p) = K_d \theta(p);$$

$$W_d(p) = \frac{R_d(p)}{\theta(p)} = \frac{K_d}{T_d p + 1}.$$

3. Задатчик З:

$$R_2 = K_3 \theta_3; R_2(p) = K_3 \theta_3(p);$$

$$W_3(p) = \frac{R_2(p)}{\theta_3(p)} = K_3.$$

4. Сравнивающее устройство (мост) М:

$$U_m = K_m (R_2 - R_d).$$

Мост состоит из двух звеньев. Первое звено осуществляет формирование сигнала ошибки системы:

$$\Delta R = R_2 - R_d.$$

Второе звено преобразует сигнал ΔR в пропорциональное ему напряжение U_m разбаланса моста:

$$U_m = K_m \Delta R; U_m(p) = K_m \Delta R(p);$$

$$W_m(p) = \frac{U_m(p)}{\Delta R(p)} = K_m.$$

5. Дифференциальный усилитель ДУ:

$$U_y = K_y (U_m - U_{oc}).$$

Дифференциальный усилитель состоит из двух звеньев. Первое звено осуществляет вычитание напряжения U_{oc} из напряжения U_m :

$$\Delta U = U_m - U_{oc}.$$

Второе звено усиливает разность ΔU :

$$U_y = K_y \Delta U; U_y(p) = K_y \Delta U(p);$$

$$W_y(p) = \frac{U_y(p)}{\Delta U(p)} = K_y.$$

6. Двигатель Д:

$$T_{дв} \frac{d^2 \varphi_{дв}}{dt^2} + \frac{d\varphi_{дв}}{dt} = K_{дв} U_y;$$

$$T_{дв} p^2 \varphi_{дв}(p) + p \varphi_{дв}(p) = K_{дв} U_y(p);$$

$$W_{дв}(p) = \frac{\varphi_{дв}(p)}{U_y(p)} = \frac{K_{дв}}{p(T_{дв} p + 1)}.$$

7. Редуктор Р:

$$\varphi_p = K_p \varphi_{дв}; \varphi_p(p) = K_p \varphi_{дв}(p);$$

$$W_p(p) = \frac{\varphi_p(p)}{\varphi_{дв}(p)} = K_p.$$

8. Устройство (потенциометр) обратной связи УОС:

$$U_{ос} = K_{п} \varphi_p; U_{ос}(p) = K_{п} \varphi_p(p);$$

$$W_{ос}(p) = \frac{U_{ос}(p)}{\varphi_p(p)} = K_{п}.$$

9. Регулирующий орган (автотрансформатор) РО:

$$U_{н} = K_{в} \varphi_p; U_{н}(p) = K_{в} \varphi_p(p);$$

$$W_{в}(p) = \frac{U_{н}(p)}{\varphi_p(p)} = K_{в}.$$

Структурная схема системы показана на рисунке 5.

Задатчик (3) системы является безинерционным. Его коэффициент передачи K_3 должен быть равен коэффициенту передачи $K_д$ датчика, поскольку заданная θ_3 и действительная θ температуры должны вычитаться в одном масштабе. Поэтому для наглядности исследования эти коэффициенты $K_д$ и K_3 можно перенести за СУ и считать, что из заданной температуры θ_3 непосредственно вычитается измеренная датчиком температура $\theta_д$ и формируется сигнал ошибки e . Преобразованная таким образом структурная схема показана на рисунке 6.

Примем следующие численные значения параметров элементов САР температуры в климатической камере:

$$\begin{aligned} K_1 &= 2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{В}; & K_2 &= 1; & T_1 &= 100 \text{ с}; & K_{д} &= 1 \text{ Ом}/^\circ\text{C}; \\ T_{д} &= 1 \text{ с}; & K_{м} &= 0,2 \text{ В}/\text{Ом}; & K_{в} &= 10; & K_{дв} &= 1 \text{ рад с}^{-1}\cdot\text{В}^{-1} \\ T_{дв} &= 0,5 \text{ с}; & K_{р} &= 0,01; & K_{б} &= 80 \text{ В}/\text{рад}; \end{aligned}$$

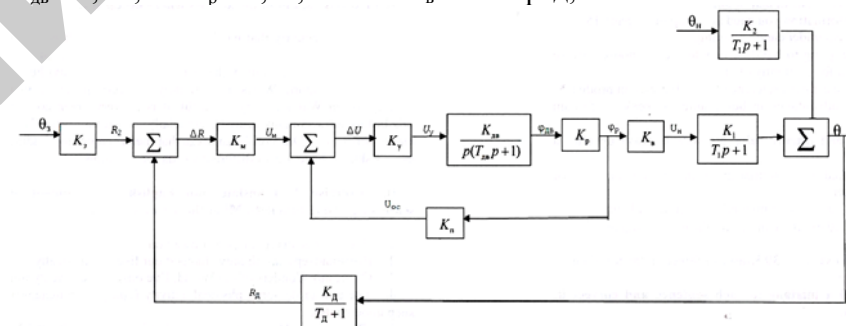


Рис. 5. Структурная схема САР температуры в климатической камере

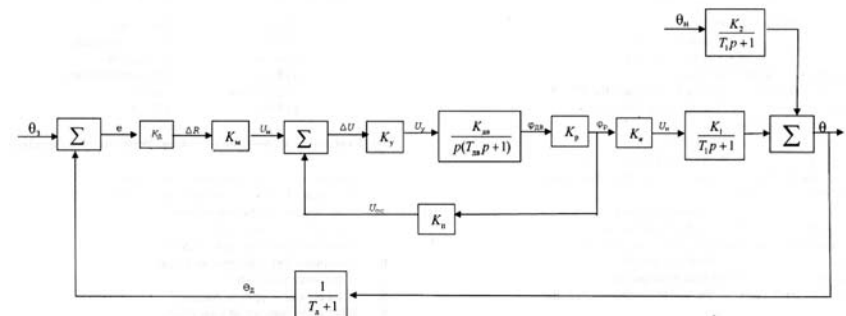


Рис. 6. Структурная схема САР температуры в климатической камере

Рассмотрим особенности структурной схемы САР на базе микропроцессорного контроллера. При этом следуют иметь в виду следующее.

Функционально цифровую систему делят на цифровую часть (ЦЧ) и непрерывную часть (НЧ). Непрерывная часть – название весьма условное, поскольку сигналы там могут носить как непрерывный, так и релейный и импульсный характеры.

Преобразование аналогового сигнала в цифровой является дискретизацией сигнала по времени и уровню (рис. 7).

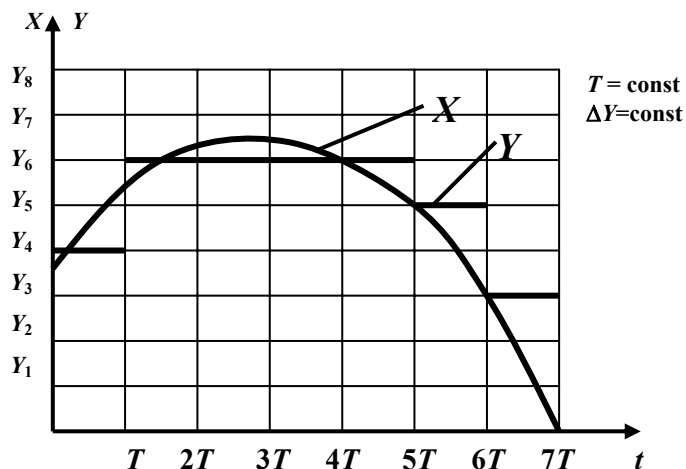


Рис. 7. Дискретизация сигнала по времени и уровню:

X – входной непрерывный сигнал; Y – уровень выходного цифрового сигнала

Дискретизация проводится через равные промежутки времени T , которые называют периодом дискретизации, или квантования сигнала по времени. В моменты времени $T, 2T, 3T, \dots$ формируется дискретный сигнал с уровнем Y_i (наиболее близким к значению непрерывного сигнала X в эти моменты времени).

Уровень Y_i представляется в виде двоичного кода и остается постоянным на протяжении последующего периода T . Шаг дискретизации по уровню $\Delta Y = Y_i - Y_{i-1}$ является постоянным.

Современные цифровые управляющие устройства – контроллеры снабжены 8–16-разрядными АЦП. Количество уровней дискретизации составляет $i = 2^k - 1$, где k – разрядность АЦП. Следовательно, количество уровней дискретизации может составить от 255 до 65535. Это обстоятельство в большинстве случаев позволяет пренебречь дискретизацией по уровню при исследовании цифровых систем управления.

Период дискретизации составляет время цикла обработки информации $T = t_b + t_{\text{вып}} + t_{\text{выв}}$, где t_b – время выборки (чтения данных АЦП); $t_{\text{вып}}$ – время выполнения вычислений ЦВУ для формирования закона управления; $t_{\text{выв}}$ – время вывода ЦАП вычисленного сигнала на последующие устройства. В современных контроллерах T составляет от миллисекунд и менее до десятых долей секунды, что позволяет пренебречь дискретизацией сигнала по времени. Это значит, что в большинстве случаев можно считать, что алгоритм управления формируется контроллером мгновенно и без искажений. При сложных алгоритмах управления, если время расчета влияет на результат управления, его можно учесть последовательным включением после цифрового управляющего устройства звена чистого запаздывания $e^{-p\tau}$ с $\tau = T$.

Для обоснования возможности пренебречь дискретизацией сигнала по времени можно использовать импульсную теорему, сформулированную и доказанную В. А. Котельниковым в 1933 году. В соответствии с этой теоремой, если сигнал не содержит частот выше, чем ω_c , он полностью описывается (без искажения спектра) своими значениями, измеряемыми в дискретные моменты времени $T = \pi/\omega_c$.

Рассчитаем ω_c для нашего объекта управления – климатической камеры.

Передаточная функция климатической камеры:

$$W_{\text{оу}} = \frac{\theta(p)}{U_{\text{н}}(p)} = \frac{K_1}{T_1 p + 1}.$$

Тогда АЧХ климатической камеры имеет вид:

$$A(\omega) = \frac{K_1}{\sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1}}.$$

Пропорционально-интегральный закон (ПИ-закон), когда управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и пропорционально интегралу ошибки:

$$X_y = K \cdot e + K_{\text{и}} \cdot \int_0^t e \cdot dt = K \left(e + \frac{1}{T_{\text{и}}} \cdot \int_0^t e \cdot dt \right).$$

Пропорционально-дифференциальный закон (ПД-закон), когда управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке и пропорционально производной ошибки:

$$X_y = K \cdot e + K_{\text{д}} \frac{de}{dt} = K \left(e + T_{\text{д}} \frac{de}{dt} \right),$$

где $T_{\text{д}}$ – постоянная дифференцирования.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-закон), когда управляющее воздействие на объект формируется пропорционально ошибке, пропорционально интегралу ошибки и пропорционально производной ошибки:

$$X_y = K \cdot e + K_{\text{и}} \cdot \int_0^t e \cdot dt + K_{\text{д}} \frac{de}{dt} = K \cdot e + \frac{1}{T_{\text{и}}} \cdot \int_0^t e \cdot dt + T_{\text{д}} \frac{de}{dt}.$$

Позиционные законы регулирования, когда управляющее воздействие на объект принимает ряд дискретных значений в зависимости от ошибки системы.

Закон регулирования во многом определяет свойства системы.

Определим закон регулирования рассматриваемой САР температуры в климатической камере.

Для этого найдем передаточную функцию, определяющую взаимосвязь управляющего воздействия $U_{\text{н}}$ на объект и ошибки e :

$$W_{\text{yy}}(p) = \frac{U_{\text{н}}(p)}{e(p)}.$$

Предварительно заменим звенья, охваченные местной обратной связью (УОС) с коэффициентом передачи $K_{\text{п}}$ (рис. 6), одним эквивалентным звеном. Передаточная функция звена или цепи, последовательно соединенных звеньев, охваченных отрицательной обратной связью, определяется по формуле:

$$W_3(p) = \frac{W_{\text{п}}(p)}{1 + W_{\text{п}}(p)} = \frac{W_{\text{п}}(p)}{1 + W_{\text{п}}(p) \cdot W_{\text{ос}}(p)},$$

где $W_{\text{п}}(p)$ – передаточная функция прямой цепи;
 $W_{\text{п}}(p)$ – передаточная функция разомкнутой цепи;
 $W_{\text{ос}}(p)$ – передаточная функция обратной связи.

В нашем случае:

$$W_3(p) = \frac{\varphi_{\text{п}}(p)}{U_{\text{м}}(p)} = \frac{\frac{K_{\text{у}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{п}}}{p \cdot (T_{\text{дв}} \cdot p + 1)}}{1 + \frac{K_{\text{у}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{н}}}{p \cdot (T_{\text{дв}} \cdot p + 1)}} = \frac{\frac{1}{K_{\text{н}}}}{\frac{T_{\text{дв}}}{K_{\text{у}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{н}}} \cdot p^2 + \frac{1}{K_{\text{у}} \cdot K_{\text{дв}} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{н}}} \cdot p + 1} = \frac{K_3}{T_{23} \cdot p^2 + T_{13} \cdot p + 1}.$$

Подставим в найденное выражение численные значения коэффициентов и получим:

$$W_3(p) = \frac{0,5}{2,5 \cdot p^2 + 5 \cdot p + 1}.$$

При последовательном соединении звеньев их передаточные функции перемножаются, поэтому:

$$W_{\text{yy}}(p) = \frac{U_{\text{н}}(p)}{e(p)} = W_3(p) K_{\text{д}} \cdot K_{\text{м}} \cdot K_{\text{в}}.$$

Окончательно для безынерционного регулятора получаем:

$$U_{\text{н}} = K_3 \cdot K_{\text{д}} \cdot K_{\text{м}} \cdot K_{\text{в}} \cdot e = K_{\text{yy}} \cdot e.$$

Зависимость управляющего воздействия $U_{\text{н}}$ от ошибки e показывает, что в рассматриваемой системе применен П-закон регулирования.

Примечание. Пусть УОС в системе отсутствует. Тогда

$$W_{\text{yy}}(p) = \frac{U_{\text{н}}(p)}{e(p)} = K_{\text{д}} \cdot K_{\text{м}} \cdot K_{\text{у}} \frac{K_{\text{дв}}}{p \cdot (T_{\text{дв}} \cdot p + 1)} \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{в}}.$$

Передаточная функция безынерционного регулятора имеет вид:

$$W_{yy}(p) = \frac{U_H(p)}{e(p)} = K_d \cdot K_m \cdot K_y \frac{K_{дв}}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1)} \cdot K_p \cdot K_b;$$

$$U_H(p) = K_d \cdot K_m \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_b \cdot \frac{1}{p} \cdot e(p),$$

поэтому $U_H(p) = K_d \cdot K_m \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_b \cdot \int_0^t e \cdot dt \cdot$

В рассматриваемом случае закон управления является интегральным.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение закона регулирования.
2. Перечислите типовые законы регулирования.
3. Дайте определение пропорционального закона регулирования.
4. Дайте определение интегрального закона регулирования.
5. Дайте определение пропорционально-интегрального закона регулирования.
6. Дайте определение пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования.
7. Дайте определение позиционного закона регулирования.

Тема 4.

ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель: получение навыков определения передаточных функций системы по управляющему и возмущающему воздействиям и передаточных функций системы для ошибки по управляющему и возмущающему воздействиям.

Задание

1. Определите передаточную функцию САР по управляющему воздействию.
2. Определите передаточную функцию САР по возмущающему воздействию.
3. Определите передаточную функцию САР для ошибки по управляющему воздействию.
4. Определите передаточную функцию САР для ошибки по возмущающему воздействию.

Теоретические сведения

Передаточная функция САР по управляющему воздействию определяет взаимосвязь между изменением регулируемой величины Y и изменением задающего воздействия Y_3 :

$$W_{zy}(p) = \frac{Y(p)}{Y_3(p)} = \frac{W_n(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{W_n(p)}{1 + W_n(p) \cdot W_{oc}(p)},$$

где $W_n(p)$ – передаточная функция прямой цепи системы;
 $W_p(p)$ – передаточная функция разомкнутой системы;
 $W_{oc}(p)$ – передаточная функция обратной связи системы.

Обычно мысленно размыкают главную обратную связь перед сравнивающим устройством. На рисунке 6 место размыкания показано волнистой чертой.

Перед нахождением передаточных функций систему необходимо, привести к одноконтурному виду, избавившись от перекрестных связей и заменив звенья, охваченные местными обратными связями и соединенные параллельно, на эквивалентные.

Для САР температуры в климатической камере задающим воздействием является заданная температура θ_3 , регулируемой величиной – температура θ в камере.

Передаточная функция W_3 , эквивалентная передаточной функции усилителя, двигателя и редуктора, охваченным местной обратной связью, найдена при выполнении раздела 3:

$$W_3(p) = \frac{0,5}{2,5 \cdot p^2 + 5 \cdot p + 1}.$$

Для рассматриваемого примера передаточная функция САР температуры в климатической камере по управляющему воздействию Θ_3 :

$$W_{3y}(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_3(p)} = \frac{\frac{0,5 \cdot K_d \cdot K_m \cdot K_b \cdot K_1}{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1)}}{1 + \frac{0,5 \cdot K_d \cdot K_m \cdot K_b \cdot K_1}{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot K_d \cdot K_m \cdot K_b \cdot K_1 \cdot (T_d \cdot p + 1)}{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) + 0,5 \cdot K_d \cdot K_m \cdot K_b \cdot K_1}.$$

Подставляем в полученное выражение численные значения параметров и, после промежуточных преобразований, получаем:

$$W_{3y}(p) = \frac{16 \cdot (1 + p)}{250 \cdot p^4 + 752,5 p^3 + 667,5 \cdot p^2 + 106 p + 17}.$$

Передаточная функция САР по возмущающему воздействию определяет взаимосвязь между изменением регулируемой величиной Y и изменением возмущающего воздействия F :

$$W_{FY}(p) = \frac{Y(p)}{F(p)} = \frac{W_F(p)}{1 + W_p(p)},$$

где $W_F(p)$ – передаточная функция цепи звеньев от места приложения возмущающего воздействия до регулируемой величины.

В рассматриваемом примере возмущающее воздействие – изменение температуры θ_n наружного воздуха приложено к ОУ, поэтому $W_{FY}(p)$ является передаточной функцией ОУ по возмущающему воздействию.

Для рассматриваемого примера передаточная функция САР температуры в климатической камере по возмущающему воздействию:

$$W_{FY}(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_n(p)} = \frac{\frac{K_2}{T_1 \cdot p + 1}}{1 + \frac{0,5 \cdot K_d \cdot K_m \cdot K_b \cdot K_1}{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}} =$$

$$= \frac{K_2 \cdot (2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) + 0,5 \cdot K_d \cdot K_m \cdot K_b \cdot K_1}.$$

Подставляем в полученное выражение численные значения параметров и, после промежуточных преобразований, получаем:

$$W_{FY}(p) = \frac{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (1 + p)}{250 \cdot p^4 + 752,5 p^3 + 667,5 \cdot p^2 + 106 p + 17}.$$

Передаточная функция САР для ошибки по управляющему воздействию определяет взаимосвязь между изменением сигнала ошибки e_3 и изменением задающего воздействия U_3 .

$$W_{3e}(p) = \frac{e_3(p)}{Y_3(p)} = \frac{1}{1 + W_p(p)}.$$

Для рассматриваемого примера передаточная функция САР температуры в климатической камере для ошибки по управляющему воздействию:

$$W_{FY}(p) = \frac{e_3(p)}{\theta_n(p)} = \frac{1}{1 + \frac{0,5 \cdot K_d \cdot K_M \cdot K_B \cdot K_1}{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}} =$$

$$= \frac{K_2 \cdot (2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) + 0,5 \cdot K_d \cdot K_M \cdot K_B \cdot K_1}.$$

Подставляем в полученное выражение численные значения параметров и, после промежуточных преобразований, получаем:

$$W_{3c}(p) = \frac{e(p)}{\theta_3(p)} = \frac{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (1 + p) \cdot (100 \cdot p + 1)}{250 \cdot p^4 + 752,5p^3 + 667,5 \cdot p^2 + 106p + 17}.$$

Передаточная функция САР для ошибки по возмущающему воздействию определяет взаимосвязь между изменением ошибки e_F и изменением возмущающего воздействия F :

$$W_{Fe}(p) = \frac{e_F(p)}{F(p)} = -\frac{W_F(p)}{1 + W_p(p)} = -W_{FY}(p).$$

Для рассматриваемого примера передаточная функция САР температуры в климатической камере для ошибки по возмущающему воздействию:

$$W_{Fe}(p) = \frac{e_F(p)}{\theta_n(p)} = -W_{FY}(p) = -\frac{(2,5p^2 + 5p + 1) \cdot (1 + p)}{250 \cdot p^4 + 752,5p^3 + 667,5 \cdot p^2 + 106p + 17}.$$

Примечание. Для системы без местной обратной связи приводить систему к одноконтурному виду нет необходимости, поскольку она уже является одноконтурной.

Передаточные функции системы находятся по вышеприведенным общим зависимостям:

$$W_{3v}(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_3(p)} = \frac{W_{\Pi}}{1 + W_p(p)} = \frac{\frac{K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1)}}{1 + \frac{K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}} =$$

$$= \frac{K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1 \cdot (T_d \cdot p + 1)}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) + K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1};$$

$$W_{FY}(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_n(p)} = \frac{\frac{K_2}{T_1 \cdot p + 1}}{1 + \frac{K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}} =$$

$$= \frac{K_2 \cdot p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) + K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1};$$

$$W_{3c}(p) = \frac{e_3(p)}{Y_3(p)} = \frac{1}{1 + W_p(p)} = \frac{1}{1 + \frac{K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}} =$$

$$= \frac{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) + K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1};$$

$$W_{Fe}(p) = \frac{e_F(p)}{\theta_n(p)} = -W_{FY}(p) = -\frac{K_2 \cdot p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}{p \cdot (T_{дв} \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1) + K_d \cdot K_M \cdot K_y \cdot K_{дв} \cdot K_p \cdot K_B \cdot K_1}.$$

После подстановки численных значений параметров и промежуточных преобразований передаточные функции примут, как и в основном примере, окончательный вид.

Контрольные вопросы

1. Дать определение передаточной функции САР по управляющему воздействию.
2. Дать определение передаточной функции САР по возмущающему воздействию.
3. Дать определение передаточной функции САР для ошибки по управляющему воздействию.
4. Дать определение передаточной функции САР для ошибки по возмущающему воздействию.

УСТОЙЧИВОСТЬ И ЗАПАСЫ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель: получение навыков анализа устойчивости системы.

Задание

1. Проанализируйте устойчивость системы по критерию Гурвица.
2. Проанализируйте устойчивость системы по критерию Найквиста.
3. Определите запасы устойчивости системы.

Теоретические сведения

Устойчивость – это свойство системы возвращаться в исходный или близкий к нему установившийся режим после снятия воздействия, вызвавшего выход из установившегося режима.

Выходная величина устойчивой системы остается ограниченной в условиях действия на систему ограниченных по величине воздействий.

Неустойчивая система является неработоспособной, поэтому проверка устойчивости является обязательным этапом анализа системы.

Условием устойчивости линейной системы является отрицательность действительной части корней характеристического уравнения системы. При нулевых корнях система находится на границе устойчивости. Поскольку решение уравнений высокого порядка сопряжено с определенными трудностями, то анализ устойчивости линейных систем проводится по алгебраическим и частотным критериям. Наиболее часто используют алгебраический критерий Гурвица и частотный критерий Найквиста.

5.1. Анализ устойчивости системы по критерию Гурвица

Передаточная функция линейной САР в общем случае имеет вид:

$$W(p) = \frac{b_0 \cdot p^m + b_1 \cdot p^{m-1} + \dots + b_{m-1} \cdot p + b_m}{a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \dots + a_{n-1} \cdot p + a_n} = \frac{R(p)}{Q(p)}, \text{ где } m < n.$$

Полином $Q(p)$, находящийся в знаменателе передаточной функции, называется характеристическим полиномом системы, поскольку он определяет характер свободного движения системы. Уравнение $Q(p) = 0$ называется характеристическим уравнением системы.

Устойчивость по критерию Гурвица проверяется следующим образом. Из коэффициентов характеристического уравнения

$$Q(p) = a_0 \cdot p^n + a_1 \cdot p^{n-1} + \dots + a_{n-1} \cdot p + a_n = 0$$

составляется определитель Гурвица (1) по следующему правилу.

По главной диагонали последовательно записываются n коэффициентов характеристического уравнения, начиная с a_1 . Сверху от элементов главной диагонали в каждом столбце записываются коэффициенты характеристического уравнения с последовательно возрастающими, а снизу – с последовательно убывающими индексами. На месте коэффициентов с индексами большими n или меньшими 0 записываются нули. Полученный определитель содержит n строк и n столбцов:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & a_1 & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \dots & a_n \end{vmatrix} \quad (1)$$

Далее составляются диагональные миноры определителя Гурвица:

$$\Delta_1 = a_1;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} \text{ и т.д.}$$

Критерий Гурвица формулируется следующим образом.

Для устойчивости линейной системы необходимо и достаточно, чтобы при $a_0 > 0$ все диагональные миноры определителя Гурвица были положительными.

Для характеристических уравнений первой и второй степеней условия устойчивости сводятся к требованию положительности всех коэффициентов.

Для уравнений третьей и четвертой степеней, помимо положительности всех коэффициентов характеристического уравнения, необходима положительность определителя Δ_{n-1} .

Поэтому условия устойчивости для систем с характеристическим уравнением третьей степени:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; \\ \Delta_2 = a_1 \cdot a_2 - a_3 \cdot a_0 > 0.$$

Условия устойчивости для систем с характеристическим уравнением четвертой степени:

$$a_0 > 0; a_1 > 0; a_2 > 0; a_3 > 0; a_4 > 0; \\ \Delta_3 = a_3 \cdot (a_1 \cdot a_2 - a_3 \cdot a_0) - a_4 \cdot a_1^2 > 0.$$

Определим устойчивость САР температуры в климатической камере. Для этого можно воспользоваться любой из полученных в п. 4 передаточных функций системы, из которых следует, что характеристическое уравнение системы:

$$Q(p) = 250 \cdot p^4 + 752,5 \cdot p^3 + 607,5 \cdot p^2 + 106 \cdot p + 17 = 0.$$

Для анализа устойчивости воспользуемся непосредственно условиями устойчивости для уравнения четвертой степени.

Все коэффициенты характеристического уравнения положительны. Проверяем второе условие:

$$\Delta_3 = 106 - (752,5 - 607,5 - 250 - 106) - 17 - 752,5^2 - 36021881 > 0.$$

Полученный результат показывает, что система устойчива.

5.2. Анализ устойчивости по критерию Найквиста

Критерий устойчивости Найквиста основан на использовании амплитудно-фазовой частотной характеристики (АФЧХ) разомкнутой системы.

Для расчета частотных характеристик линейных звеньев и систем пользуются частотной передаточной функцией.

Частотной передаточной функцией называется отношение изображения Фурье выходной величины Y к изображению Фурье входного воздействия X при нулевых начальных условиях.

Формально частотную передаточную функцию можно найти заменой в передаточной функции переменной p на переменную $j\omega$.

Частотная передаточная функция является комплексной функцией:

$$W(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = U(\omega) + jV(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}.$$

где $Y(j\omega)$ и $X(j\omega)$ – изображения Фурье выходной величины и входного воздействия;

$U(\omega)$ – вещественная часть частотной передаточной функции;

$V(\omega)$ – мнимая часть частотной передаточной функции;

$A(\omega)$ – модуль частотной передаточной функции;

$\varphi(\omega)$ – аргумент частотной передаточной функции.

$$A(\omega) = \sqrt{U^2(\omega) + V^2(\omega)}; \quad (2)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}. \quad (3)$$

Модуль $A(\omega)$ является амплитудной частотной характеристикой (АЧХ) звена или системы, а аргумент $\varphi(\omega)$ – фазовой частотной характеристикой (ФЧХ) звена или системы.

АЧХ и ФЧХ характеризуют реакцию системы или звена на гармоническое воздействие.

АЧХ называется зависимость отношения амплитуд выходного и входного гармонических сигналов от частоты в установившемся режиме.

ФЧХ называется зависимость разности фаз между выходным и входным сигналами от частоты в установившемся режиме.

АФЧХ характеризует зависимость отношения амплитуд и разности фаз от частоты одновременно.

Строится график АФЧХ в координатах $U(\omega)$ и $jV(\omega)$. Для этого рассчитываются $U(\omega)$ и $V(\omega)$ или $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ при изменении частоты ω от 0 до ∞ . Длина вектора, соединяющего начало координат с графиком АФЧХ, равна значению $A(\omega)$ при частоте ω , а угол поворота от оси U равен $\varphi(\omega)$ при частоте ω .

Формулировки критерия Найквиста

1. Если система в разомкнутом состоянии устойчива, то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы при изменении частоты от нуля до бесконечности не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$.

2. Если система в разомкнутом состоянии находится на границе устойчивости (является астатической), то для устойчивости замкнутой системы необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы, дополненная дугой бесконечно большого радиуса против часовой стрелки до действительной полуоси, не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$.

3. Если система в разомкнутом состоянии неустойчива, то для устойчивости в замкнутом состоянии необходимо и достаточно,

чтобы АФЧХ разомкнутой системы охватывала точку с координатами $(-1, j0)$ в положительном направлении $\kappa/2$ раз, где κ – число корней характеристического уравнения с положительной действительной частью.

Разомкнутая система устойчива, если устойчивы все отдельные звенья системы после приведения ее к одноконтурному виду. Устойчивость отдельных звеньев определяют по любому из критериев устойчивости.

Определим устойчивость САР температуры в климатической камере с принятыми нами численными значениями параметров.

Разомкнем систему (место размыкания показано волнистой чертой на рисунке 6).

Передаточная функция разомкнутой системы:

$$W(p) = \frac{K_d \cdot K_m \cdot K_3 \cdot K_b \cdot K_1}{(T_{23} \cdot p^2 + T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_1 \cdot p + 1) \cdot (T_d \cdot p + 1)}.$$

Все звенья разомкнутой системы устойчивы, поскольку одно звено имеет 2-ой порядок, два звена – 1-ый порядок и коэффициенты их характеристических уравнений положительны.

Частотная передаточная функция разомкнутой системы:

$$W(p) = \frac{K_d \cdot K_m \cdot K_3 \cdot K_b \cdot K_1}{(T_{23} \cdot (j\omega)^2 + T_1 \cdot j\omega + 1) \cdot (T_1 \cdot j\omega + 1) \cdot (T_d \cdot j\omega + 1)}.$$

Подставим в частотную передаточную функцию численные значения параметров:

$$W(p) = \frac{16}{(2,5 \cdot (j\omega)^2 + 5 \cdot j\omega + 1) \cdot (100 \cdot j\omega + 1) \cdot (j\omega + 1)}.$$

Для построения АФЧХ разомкнутой системы представим частотную передаточную функцию в виде:

$$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega).$$

Тогда:

$$W_p(j\omega) = \frac{16}{(1 - 607,5 \cdot \omega^2 + 250 \cdot \omega^4) + j \cdot (106 \cdot \omega - 752,5 \omega^3)} =$$

$$= \frac{16 \cdot ((1 - 607,5 \cdot \omega^2 + 250 \cdot \omega^4) - j \cdot (106 \cdot \omega - 752,5 \omega^3))}{(1 - 607,5 \cdot \omega^2 + 250 \cdot \omega^4)^2 + (106 \cdot \omega - 752,5 \omega^3)^2}$$

Получаем:

$$U(\omega) = \frac{16 \cdot (11 - 607,5 \cdot \omega^2 + 250 \cdot \omega^4)}{(1 - 607,5 \cdot \omega^2 + 250 \cdot \omega^4)^2 + (106 \cdot \omega - 752,5 \omega^3)^2};$$

$$jV(\omega) = -j \frac{16(106\omega - 752\omega^3)}{(1 - 607,5\omega^2 + 250\omega^4)^2 + (106\omega - 752,5\omega^3)^2}$$

По этим выражениям, придавая ω значения от 0 до ∞ , строим на комплексной плоскости АФЧХ разомкнутой системы (рис. 1).

АФЧХ разомкнутой системы не охватывает точку с координатами $(-1, j0)$, поэтому замкнутая система устойчива.

АФЧХ разомкнутой системы можно было бы построить, рассчитав значения $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$.

Для упрощения расчетов $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ пользуются следующими правилами.

Модуль дробной частотной передаточной функции равен отношению модуля числителя к модулю знаменателя.

Модуль произведения равен произведению модулей.

Аргумент дробной частотной передаточной функции равен разности аргументов числителя и знаменателя.

Аргумент произведения равен сумме аргументов.

Для расчета модулей и аргументов используют выражения (2) и (3).

Таким образом, по вышеприведенным правилам выражения для модуля $A(\omega)$ и аргумента $\varphi(\omega)$ можно записать практически без преобразований:

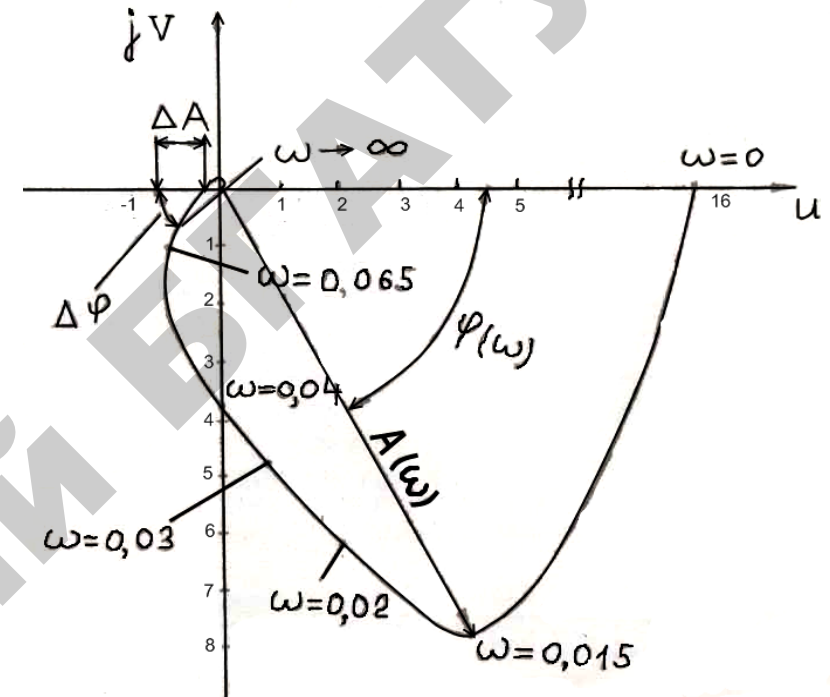


Рис. 10. АФЧХ разомкнутой системы

$$|W(j\omega)| = A(\omega) = \frac{K_d K_M K_3 K_B K_1}{\sqrt{T_{13}^2 \omega^2 + (1 - T_{23} \omega^2)^2} \sqrt{(T_1^2 \omega^2 + 1)} \sqrt{(T_d^2 \omega^2 + 1)}}$$

$$\arg W(j\omega) = \varphi(\omega) = 0 - \arctg \frac{T_{13} \omega}{1 - T_{23} \omega^2} - \arctg T_1 \omega - \arctg T_d \omega$$

Очевидно, что расчеты также упрощаются.

На рисунке 10 показано построение одной точки АФЧХ для $\omega_1 = 0,015$ по значениям $A(\omega_1)$ и $\varphi(\omega_1)$.

При анализе устойчивости пользуются также логарифмическими амплитудными (ЛАХ) и фазовыми (ЛФХ) характеристиками (1, 2).

Построение АФЧХ разомкнутой системы следует выполнить одним из вышеприведенных методов.

5.3. Определение запасов устойчивости

При оценке устойчивости систем одного факта устойчивости недостаточно. Необходимо также оценивать величину запаса, устойчивости, т.е. степени удаленности системы от границы устойчивости. Система, которая теоретически является устойчивой, но находится очень близко к границе устойчивости, при её реализации может оказаться неустойчивой вследствие неточности математического описания системы, использованного при оценке устойчивости, вследствие приближенной практической реализации системы и неточностей при наладке, из-за изменения во времени параметров системы в процессе ее эксплуатации.

Основное распространение в качестве меры запаса устойчивости получили вытекающие из критерия Найквиста две величины – запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi$ и запас устойчивости по амплитуде ΔA .

Запас устойчивости по фазе определяется величиной $\Delta\varphi$, на которую должно возрасти запаздывание по фазе, чтобы система оказалась на границе устойчивости.

Запас устойчивости по амплитуде определяется величиной ΔA допустимого увеличения АЧХ, при котором система окажется на границе устойчивости. Таким образом, запас устойчивости по амплитуде представляет собой запас по коэффициенту передачи разомкнутой системы по отношению к его критическому по устойчивости значению.

Величины $\Delta\varphi$ и ΔA показаны на рисунке 11.

Для определения $\Delta\varphi$ проводится дуга радиусом 1 до пересечения с АФЧХ.

При проектировании САУ рекомендуется выбирать $\Delta\varphi \geq 30^\circ$ и $\Delta A \geq 0,7$.

Для рассматриваемого примера САУ температуры в климатической камере $\Delta\varphi \approx 50^\circ$, $\Delta A \approx 0,7$, что удовлетворяет рекомендуемым величинам запасов устойчивости по фазе и амплитуде.

Примечание. Некоторые особенности имелись бы для системы без местной обратной связи при анализе устойчивости по критерию Найквиста.

Рассмотрим эти особенности. Передаточная функция разомкнутой системы имела бы вид:

$$W(p) = \frac{K_d K_m K_y K_{дв} K_p K_v K_1}{p(T_{дв} p + 1)(T_1 p + 1)(T_d p + 1)}.$$

Такую систему называют астатической.

В общем случае астатическими называются системы, которые после приведения к одноконтурному виду в разомкнутом состоянии содержат интегрирующие звенья. Количество интегрирующих звеньев определяет степень астатизма системы.

В рассматриваемом случае система содержит одно интегрирующее звено (передаточная функция $1/p$), поэтому она является системой с астатизмом 1-го порядка.

Характеристическое уравнение разомкнутой системы имеет нулевой корень. Это значит, что она находится на границе устойчивости. Поэтому применяем формулировку критерия Найквиста для астатических систем (формулировка 2).

$$A(\omega) = \frac{K_d K_m K_y K_{дв} K_p K_v K_1}{\omega \sqrt{T_{дв}^2 \omega^2 + 1} \sqrt{(T_1^2 \omega^2 + 1)} \sqrt{(T_d^2 \omega^2 + 1)}}.$$

$$\varphi(\omega) = 0 - \arctg \frac{\omega}{0} - \arctg T_{дв} \omega - \arctg T_1 \omega - \arctg T_d \omega.$$

АФЧХ разомкнутой системы могла бы иметь вид 1 – для устойчивой, 2 – для неустойчивой и 3 – для находящейся на границе устойчивости замкнутой системы (рис. 11).

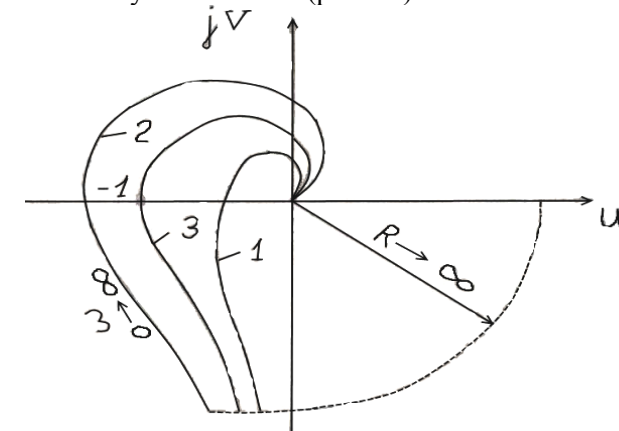


Рис. 11. Возможный вид АФЧХ разомкнутой системы с астатизмом 1-го порядка

Контрольные вопросы

1. Дайте определение устойчивости.
2. Сформулируйте критерий устойчивости Гурвица.
3. Сформулируйте критерий устойчивости Найквиста.
4. Изложите понятие и смысл запасов устойчивости по амплитуде и фазе.

Тема 6.

СТАТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО УПРАВЛЯЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Цель: получение навыков определения статической точности системы по управляющему воздействию.

Задание

1. Запишите передаточную функцию системы для ошибки по управляющему воздействию.
2. Определите зависимость статической ошибки системы от изменения управляющего воздействия на систему.

Теоретические сведения

При выполнении такого анализа используют передаточную функцию системы для ошибки по управляющему воздействию.

Вспользуемся передаточной функцией для ошибки по управляющему воздействию, полученной в разделе 4 (для нашего примера):

$$W_{ze}(p) = \frac{e_3(p)}{\theta_3(p)} = \frac{1}{1 + \frac{0,5K_d K_M K_B K_1}{(2,5p^2 + 5p + 1)(T_1 p + 1)(T_d p + 1)}}.$$

В статике p обращается в ноль, поэтому

$$\frac{e_3}{\theta_3} = \frac{1}{1 + 0,5K_d K_M K_B K_1} = \frac{1}{1 + K},$$

где K – коэффициент передачи разомкнутой системы.

Таким образом, $e_3 = \frac{1}{1+K} \theta_3$.

После подстановки численного значения K получаем $e_3 = 0,06 \theta_3$.

Рассматриваемая система имеет статическую ошибку, пропорциональную изменению управляющего воздействия на систему.

Из выражения для статической ошибки следует, что величина статической ошибки тем меньше, чем больше коэффициент передачи разомкнутой системы.

Следует отметить, что в общем случае наличие статической ошибки характерно для статических систем.

Примечание. Рассмотрим эту же систему, но без местной обратной связи. Ее передаточная функция для ошибки по управляющему воздействию:

$$W_{ze}(p) = \frac{e_3(p)}{\theta_3(p)} = \frac{p(T_{дв}p+1)(T_1p+1)(T_d p+1)}{p(T_{дв}p+1)(T_1p+1)(T_d p+1) + K_d K_m K_y K_{дв} K_1}$$

В статике (при $p = 0$) $W_{ze}(p)$ обращается в ноль, поэтому статическая ошибка по управляющему воздействию отсутствует.

В общем случае отсутствие статической ошибки по управляющему воздействию является следствием астатизма системы. Как показано в предыдущем разделе, рассматриваемая система обладает астатизмом 1-го порядка.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется статическая точность САР по управляющему воздействию?

2. Запишите общие выражения для статических ошибок статической и астатической систем по управляющему воздействию.

Тема 7.

СТАТИЧЕСКАЯ ТОЧНОСТЬ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ПО ВОЗМУЩАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ

Цель: получение навыков определения статической точности системы по возмущающему воздействию.

Задание

1. Запишите передаточную функцию системы для ошибки по возмущающему воздействию.
2. Определите зависимость статической ошибки системы от изменения возмущающего воздействия на систему.
3. Проведите совместный анализ изменения управляемой величины объекта управления и системы от изменения возмущающего воздействия в статике.

Теоретические сведения

Для проведения такого анализа пользуются передаточными функциями объекта управления и системы по возмущающему воздействию, а также передаточной функцией системы для ошибки по возмущающему воздействию. Воспользуемся передаточными функциями объекта управления и системы по возмущающему воздействию (для нашего примера):

$$W_F(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_n(p)} = \frac{K_2}{T_1 p + 1};$$

$$W_{FY}(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_n(p)} = \frac{W_F(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{K_2(2,5p^2 + 5p + 1)(T_d p + 1)}{(2,5p^2 + 5p + 1)(T_1 p + 1)(T_d + 1) + 0,5K_d K_m K_y K_1}$$

В статике p обращается в ноль, поэтому для объекта:

$$\frac{\theta}{\theta_n} = K_2; \theta = K_2 \theta_n.$$

Для системы:

$$\frac{\theta}{\theta_n} = \frac{K_2}{1+K}; \theta = \frac{K_2}{1+K} \theta_n,$$

где K – коэффициент передачи разомкнутой системы.

После подстановки численных значений параметров получаем зависимость изменения температуры на объекте при изменении наружной температуры:

$\theta = \theta_n$ – для объекта без регулятора;

$\theta = 0,06 \theta_n$ – для объекта, снабженного регулятором (САР). Передаточная функция системы для ошибки по возмущающему воздействию:

$$W_{Fe} = \frac{W_F}{1+W_p(p)} = -W_{FY}(p).$$

Поэтому для нашего примера $e_{ст} = -0,06 \theta$.

Таким образом, температура в климатической камере, не оборудованной регулятором, изменяется так же, как изменяется наружная температура.

В климатической камере, оборудованной регулятором, изменение температуры уменьшилось по сравнению с изменением наружной температуры в $K + 1$ раз. В рассматриваемом примере изменение температуры в камере составляет около 6 % от изменения наружной температуры.

Это свидетельствует о том, что эксплуатационные качества климатической камеры, с точки зрения постоянства поддержания требуемой температуры, существенно улучшились.

Примечание. Передаточная функция по возмущающему воздействию этой же системы без местной обратной связи:

$$W_{FY}(p) = \frac{\theta(p)}{\theta_n(p)} = \frac{K_2 p (T_{дв} p + 1) (T_d p + 1)}{p (T_{дв} p + 1) (T_1 p + 1) (T_d p + 1) + K_d K_m K_y K_{дв} K_p K_v K_1},$$

в статике (при $p = 0$) обращается в ноль.

Поэтому в статическом режиме при изменении наружной температуры изменение температуры внутри климатической камеры, снабженной регулятором, происходить не будет. Статическая ошибка такой системы равна 0.

Контрольные вопросы

1. Чем определяется статическая точность САР по возмущающему воздействию?
2. Запишите общие выражения для статических ошибок статической и астатической системы (со статическим объектом и астатическим объектом по возмущающему воздействию).

Тема 8.
**ОЦЕНКА КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ
ПО ПЕРЕХОДНЫМ ФУНКЦИЯМ**

Цель: получение навыков определения параметров качества регулирования по переходным функциям САР (оценки качества переходных процессов).

Задание

1. Определите перерегулирование системы по управляющему и возмущающему воздействиям.
2. Определите быстродействие системы по управляющему и возмущающему воздействиям.
3. Определите колебательность системы по управляющему и возмущающему воздействиям.
4. Определите статическую точность системы по управляющему и возмущающему воздействиям.
5. Сделайте выводы о качестве регулирования.

Теоретические сведения

Качество переходных процессов в линейных системах обычно оценивают по переходным функциям.

Переходной функцией $h(t)$ называется график изменения во времени управляемой (регулируемой) величины системы при подаче на систему единичного управляющего или возмущающего воздействий.

Показатели качества управления, определяемые непосредственно по переходным функциям, называют прямыми показателями качества управления.

Для линейных систем переходную функцию по какому-либо воздействию обычно получают при равенстве всех остальных воздействий. Это позволяет оценивать качество управления отдельно для каждого воздействия, что более удобно.

В настоящее время переходные функции наиболее целесообразно получать путем моделирования на ЭВМ. На рисунках 12 и 13 показаны переходные функции рассматриваемой нами в качестве примера САР температуры в климатической камере, полученные путем моделирования на ПЭВМ с использованием программы «ANALIS».

Рассмотрим оценку прямых показателей качества управления на нашем примере.

8.1. Отклонение регулируемой величины от своего установившегося значения характеризуется следующими показателями.

Для переходной функции по управляющему воздействию определяется перерегулирование:

$$\sigma = \frac{h_{\max 1} - h_{\text{уст}}}{h_{\text{уст}}} 100 \%,$$

где $h_{\max 1}$ – максимальное значение регулируемой величины в переходном процессе;

$h_{\text{уст}}$ – установившееся значение регулируемой величины.

Для нашего примера

$$\sigma = \frac{\theta_{\max 1} - \theta_{\text{уст}}}{\theta_{\text{уст}}} 100 \% = \frac{1,14 - 0,94}{0,94} 100 = 21 \%. .$$

Если нет специальных требований к системе, то нормальным считается перерегулирование $\sigma \leq 30 \%$. Перерегулирование так же характеризует запас устойчивости системы. При $\sigma \leq 30 \%$ в большинстве случаев запас устойчивости достаточен.

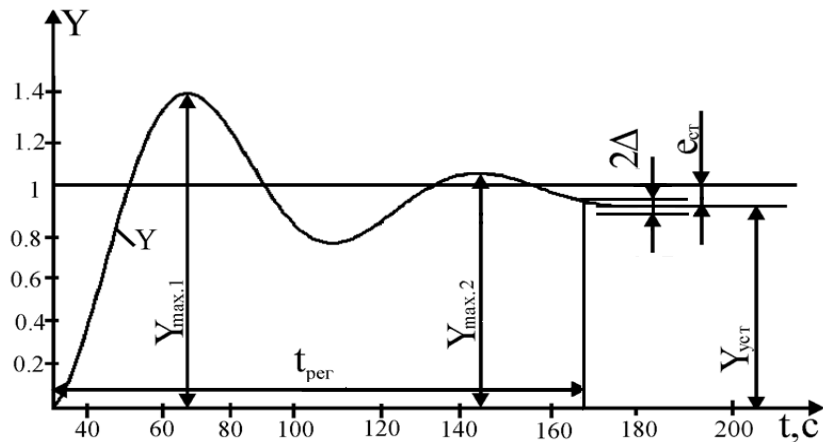


Рис. 12. Переходная функция по управляющему воздействию температуры в климатической камере

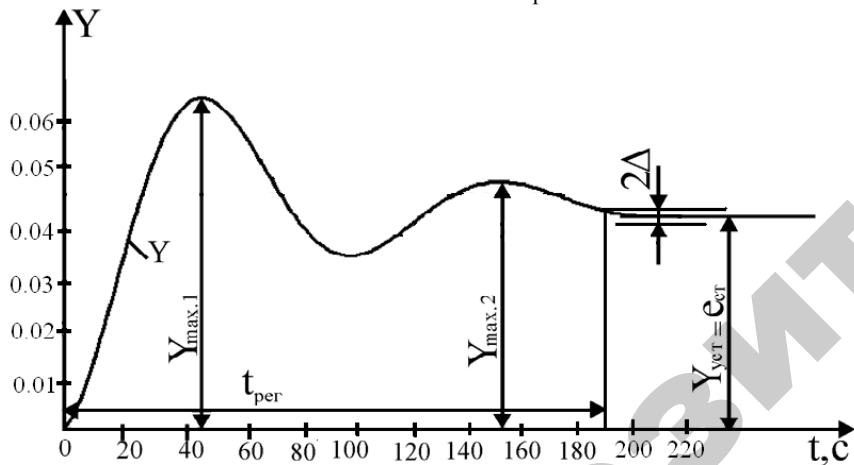


Рис. 13. Переходная функция по возмущающему воздействию температуры в климатической камере

Для переходных процессов по возмущающему воздействию определяется максимальное отклонение регулируемой величины от установившегося значения, приходящееся на единицу возмущающего воздействия $F(t)$:

$$\sigma_F = \frac{h_{\max 1} - h_{\text{уст}}}{F(t)}$$

В нашем примере при $F(t) = l(t)$

$$\sigma_F = \frac{\theta_{\max 1} - \theta_{\text{уст}}}{l(t)} = 7,74 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2} = 1,74 \cdot 10^{-2}$$

8.2. Быстродействие системы оценивается временем регулирования. Время регулирования $t_{\text{пер}}$ определяется как интервал времени от начала переходной функции до момента, когда отклонение регулируемой величины от ее нового установившегося значения становится меньше определенной достаточно малой величины Δ :

$$|h(t) - h_{\text{уст}}| \leq \Delta$$

Обычно в качестве Δ берут от 1 до 5 % от нового установившегося значения регулируемой величины для переходной функции по управляющему воздействию. Для переходной функции по возмущающему воздействию, если статическая ошибка по возмущающему воздействию отсутствует (астатические системы), в качестве Δ берут от 1 до 5 % от максимального отклонения регулируемой величины от установившегося значения, поскольку в этом случае установившиеся значения равны 0.

Если статическая ошибка не равна 0 (статические системы или астатические) при равенстве астатизма системы с передаточной функцией W_F (например, астатический объект управления) Δ определяют так же как, и для переходных функций по управляющему воздействию.

Применим $\Delta = 0,05h_{\text{уст}}$.

В нашем примере для переходной функции по управляющему воздействию:

$$\Delta = 0,05\theta_{\text{уст}} = 0,05 \cdot 0,94 = 0,047 ;$$

$t_{\text{пер}} = 41 \text{ с}$ (рис. 12).

Для переходной функции по возмущающему воздействию:

$$\Delta = 0,05(\theta_{\max} - \theta_{\text{уст}}) = 0,05 \cdot 1,74 \cdot 10^{-2} = 8,7 \cdot 10^{-4};$$

$t_{\text{пер}} = 41$ с (рис. 13).

8.3. Колебательность переходного процесса определяется числом N перерегулирований для переходной функции по управляющему воздействию или числом колебаний N для переходной функции по возмущающему воздействию за время переходного процесса.

Для рассматриваемого примера $N = 1$.

Обычно приемлемым числом колебаний считается $N < 2 \dots 3$.

Колебательность также оценивается отношением соседних отклонений регулируемой величины от установившегося значения:

$$C = \frac{h_{\max 2} - h_{\text{уст}}}{h_{\max 1} - h_{\text{уст}}}.$$

Эта величина так и называется колебательностью. Чем меньше колебательность, тем лучше считается качество управления.

Иногда колебательность оценивается декрементом затухания $d = Ln \cdot (1/C)$. Применяются и другие оценки декремента затухания, например, отношение соседних отклонений от $h_{\text{уст}}$.

В рассматриваемом примере для переходной функции по управляющему воздействию (рис. 7):

$$C_V = \frac{\theta_{\max 2} - \theta_{\text{уст}}}{\theta_{\max 1} - \theta_{\text{уст}}} = \frac{0,95 - 0,94}{1,14 - 0,94} = 0,05.$$

Для переходного процесса по возмущающему воздействию (рис. 8):

$$C_V = \frac{\theta_{\max 2} - \theta_{\text{уст}}}{\theta_{\max 1} - \theta_{\text{уст}}} = \frac{6,09 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}}{7,74 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}} = 0,05.$$

4. По переходным функциям может быть определена также и статическая ошибка системы по управляющему и возмущающему воздействиям:

$$e_{\text{ст}} = h_{\text{зад}} - h_{\text{уст}},$$

где $h_{\text{зад}}$ – заданное значение регулируемой величины.

Для нашего примера статическая ошибка для переходной функции по управляющему воздействию:

$$e_3 = \theta_3 - \theta_{\text{уст}} = 1 - 0,94 = 0,06,$$

что совпадает с результатом, полученным в разделе 6 при $\theta = 1$.

Статическая ошибка по возмущающему воздействию:

$e_F = \theta_3 - \theta_{\text{уст}} = -0,06$, поскольку переходная функция по возмущающему воздействию получена при $\theta = 0$. Этот результат совпадает с результатом, полученным в пункте 7 при $\theta_n = 1$.

По результатам выполнения раздела 8 для САР температуры в климатической камере следует сделать следующие выводы.

Для рассмотренной системы перерегулирование σ составляет 21 %, число перерегулирований и колебаний системы за время переходного процесса $N = 1$. Качество системы по этим показателям следует считать удовлетворительным.

Время регулирования составляет около 41 с, максимальное отклонение регулируемой величины от ее установившегося значения, приходящееся на единицу ступенчатого возмущающего воздействия, составляет $1,74 \cdot 10^{-2}$, колебательность системы – около 0,05, изменение статической ошибки системы при изменении задающего воздействия и возмущающего воздействия составляет 6 % от изменения этих воздействий.

Качество системы по этим показателям следует считать удовлетворительным.

Контрольные вопросы

1. Объясните физический смысл применения рассмотренных показателей качества регулирования.
2. Объясните для каждого показателя, что предпочтительнее – его уменьшение или увеличение.

Тема 9.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДИКА СИНТЕЗА ПОЗИЦИОННЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ЭВМ

Цель: получение навыков синтеза систем позиционных систем автоматического регулирования с применением моделирования на ЭВМ.

Задание

1. Изложить методику синтеза систем с объектом, требующим охлаждения, с подробным графическим изображением ожидаемых результатов.

Теоретические сведения

Позиционными системами автоматического регулирования (САР) называют системы, в которых управляющее воздействие на объект формируется в виде ступенчатых воздействий, изменяющихся при определенных уровнях ошибки.

В двухпозиционных системах управляющие воздействия на объект могут приобретать только два значения, в трехпозиционных – три и т. д.

Позиционные системы являются наиболее простыми и поэтому широко используются в сельском хозяйстве и других отраслях, в основном, для управления температурными режимами, например, в инкубаторах, холодильных установках, сушильных агрегатах.

Характерной особенностью позиционных систем является наличие установившихся автоколебательных режимов работы и смещение значения регулируемой величины при изменении возмущающего воздействия, в том числе и автоколебательного процесса.

Показателями качества регулирования позиционных систем являются точность, частота автоколебаний, быстродействие и динамические от-

клонения в переходных режимах. Для трехпозиционных и многопозиционных систем следует также обеспечить отсутствие многопозиционных автоколебаний. Эти требования зачастую противоречат друг другу, поэтому задача синтеза носит системный характер и наиболее достоверно может быть решена путем моделирования на ЭВМ.

В системах (а таких большинство), связанных с обеспечением температурного режима, также стоит задача найти уставки регулятора, обеспечивающие минимальный расход энергии. Пусть, например, температура на объекте может меняться от нижнего допустимого уровня $Y_{н.доп}$ до верхнего допустимого уровня $Y_{в.доп}$. Тогда с энергетической точки зрения выгодно, чтобы уставка регулятора обеспечивала значение температур близких к $Y_{н.доп}$, но не менее при любых возмущающих воздействиях.

На первом этапе (как и для любых других систем) решается вопрос изучения условий функционирования объекта, формирования алгоритма функционирования и требований к показателям качества. Проводится вывод дифференциальных уравнений объекта по управляющему и возмущающему воздействиям или идентификация объекта по этим воздействиям.

На втором этапе проводится собственно синтез закона регулирования.

Рассмотрим этот вопрос, начиная с более простого случая – двухпозиционного регулирования.

Для определенности будем рассматривать случай обеспечения температурного режима путем подогрева. Тогда структурная схема системы имеет вид, изображенный на рисунке 14.

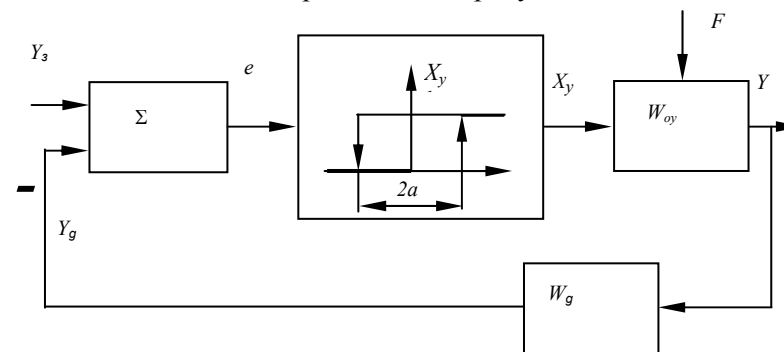


Рис. 14. Структурная схема двухпозиционной системы: Y_3 – заданное значение регулируемой величины; Y – значение регулируемой величины; X_y – управляющее воздействие на объект; F – возмущающее воздействие на объект; Y_g – сигнал датчика; $2a$ – ширина зоны неоднозначности; Σ – сравнивающее устройство; W_{oy} – математическая модель объекта по управляющему и возмущающему воздействиям; W_g – математическая модель датчика

При выборе последовательности решения задачи учтем следующее. Системы с позиционными законами обладают высоким быстродействием, поскольку управляющее воздействие на объект формируется ступенчато. Учитывая это, решение задачи целесообразно начинать с обеспечения точности регулирования.

Величину X_y изменения ступенчатого управляющего воздействия выбирают из условия обеспечения требуемого значения регулируемой величины во всем диапазоне изменения возмущающего воздействия без существенного запаса, поскольку увеличение X_y увеличивает амплитуду автоколебаний и, таким образом, снижает точность. Например, в системах отопления рассчитывается тепловая мощность, обеспечивающая требуемое значение температуры в помещении при минимальной наружной температуре.

При выборе ширины $2a$ зоны неоднозначности необходимо учитывать следующее. Чем меньше $2a$, тем меньше амплитуда автоколебаний и, следовательно, выше точность регулирования, но при этом возрастает частота автоколебаний. Это приводит к более частому срабатыванию исполнительного устройства, что снижает надежность системы. Компромисс достигается при моделировании системы путем варьирования ширины зоны неоднозначности.

Если амплитуда автоколебаний существенно меньше $Y_{в.доп}$ – $Y_{н.доп}$, то, с целью экономии энергии, уставку Y_3 регулятора следует выбрать минимальной, но так, чтобы температура не выходила за допустимый предел $Y_{н.доп}$. Проводится это путем моделирования при максимальном возмущающем воздействии (минимальной наружной температуре). Переходный процесс после включения системы и установившийся процесс автоколебаний, полученный в результате этого, показаны на рисунке 15 (кривая 1). Затем проводится проверка работы системы при минимальном возмущающем воздействии (температуре близкой к зоне неоднозначности, кривая 2). Если при этом температура не выходит за допустимый предел $Y_{в.доп}$, то задача обеспечения точности системы решена положительно.

После этого следует проверить реакцию системы на изменение управляющего воздействия Y_3 и возмущающего F . При необходимости быстродействие системы можно повысить, увеличив величину ступенчатого воздействия X_y , но следует учитывать, что это приведет к увеличению амплитуды и частоты автоколебаний.

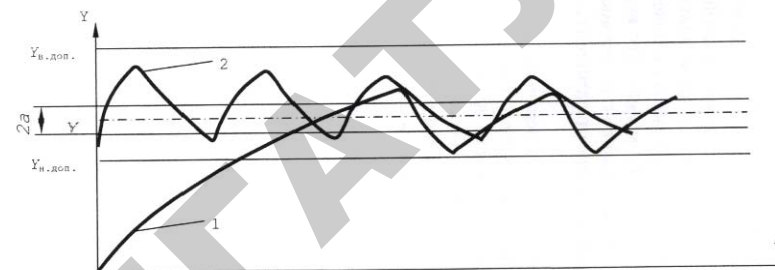


Рис. 15. Переходные процессы и установившиеся режимы работы двухпозиционной системы: 1 – при максимальном возмущающем воздействии (минимальной наружной температуре); 2 – при возмущающем воздействии (наружной температуре, близкой к зоне неоднозначности)

Аналогичным образом решается задача по синтезу систем, обеспечивающих охлаждение объекта. Разница заключается в том, что максимальному возмущающему воздействию соответствует максимальная наружная температура, минимальному – температура, близкая к верхней границе зоны неоднозначности. Вид графиков будет иметь перевернутый характер.

Рассмотрим особенности синтеза трехпозиционных систем. Для определенности также будем рассматривать случай обеспечения температурного режима путем подогрева. Тогда структурная схема системы имеет вид, изображенный на рисунке 16.

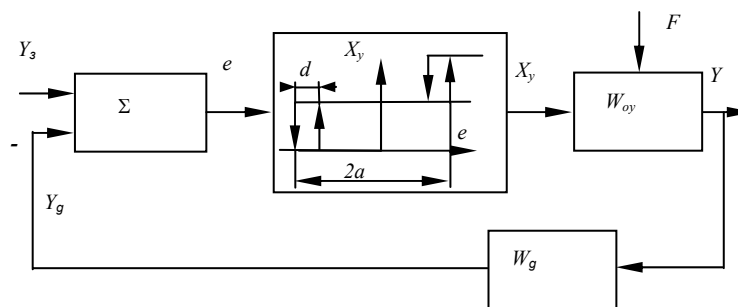


Рис. 16. Структурная схема трехпозиционной системы: Y_3 – заданное значение регулируемой величины; Y – значение регулируемой величины; X_y – управляющее воздействие на объект; F – возмущающее воздействие на объект; Y_g – сигнал датчика; $2a$ – ширина зоны нечувствительности; d – дифференциал (зоны неоднозначности); Σ – сравнивающее устройство; W_{oy} – математическая модель объекта по управляющему и возмущающему воздействиям; W_g – математическая модель датчика

Величину X_y изменения управляющего воздействия на объект выбирают из тех же соображений, что и для двухпозиционных систем. Разница заключается в том, что X_y складывается из двух ступенчатых воздействий. Обычно ступенчатые воздействия принимаются равными $0,5 X_y$.

Дифференциалы d выбирают из тех же соображений, что и зону неоднозначности для двухпозиционных систем, моделируя работу системы около одного из порогов срабатывания, например, около нижнего (при большом возмущающем воздействии – низкой наружной температуре).

Затем рациональный порядок синтеза может быть следующий.

Расположим нижний порог срабатывания регулятора на уровне $Y_{н.доп.}$. Ширину зоны нечувствительности выберем достаточно большой, чтобы не возникло многопозиционных автоколебаний. Моделируем работу системы при максимальном F (минимальной температуре), последовательно смещая нижний порог вверх путем изменения Y_3 до тех пор, пока автоколебания станут выше $Y_{н.доп.}$ (см. рис. 17).

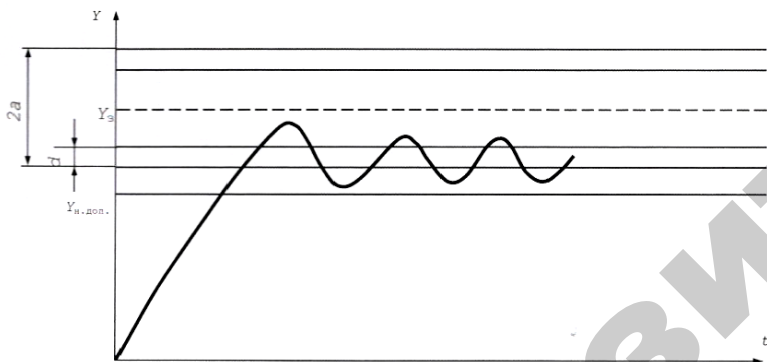


Рис. 17. Переходный процесс и установившийся автоколебательный режим при автоколебаниях максимально смещенных вниз

Моделируем систему при последовательном уменьшении F (увеличении температуры) до окончания автоколебаний и затем подтягиваем верхний порог срабатывания регулятора путем изменения Y_3 и верхней границы зоны $2a$ к максимальному значению регулируемой величины (см. рис. 18).

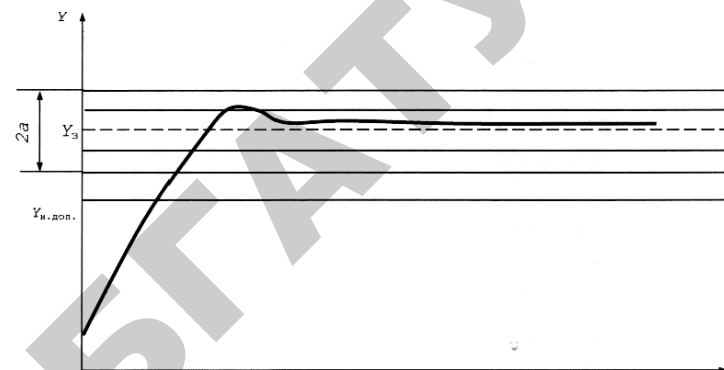


Рис. 18. Переходный процесс и установившийся режим работы при отсутствии автоколебаний (зона неоднозначности максимально сужена)

Моделируем систему при последовательном уменьшении F (увеличении температуры) до окончания автоколебаний около верхнего порога срабатывания регулятора (см. рис. 19).

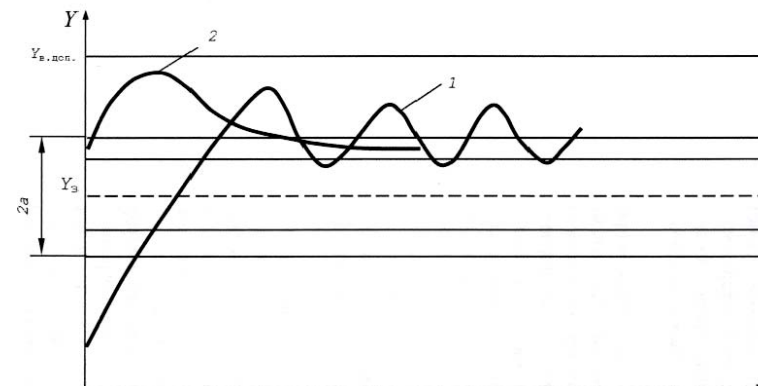


Рис. 19. Переходный процесс и автоколебательный режим максимально смещенный вверх (кривая 1); переходный процесс и установившийся неколебательный режим (кривая 2)

Если Y не выходит за предел $Y_{в.доп.}$, то цели достигнуты – система обеспечивает требуемую точность, расход энергии минимальный для трехпозиционной системы.

Следует отметить, что многопозиционные системы обеспечивают меньшую точность, поскольку следует обеспечить отсутствие многопозиционных автоколебаний. Их применение связано с технологическими требованиями к функционированию объекта. Примером может служить требование обеспечить допустимую разность температур воздуха внутри животноводческого помещения и воздуха, подаваемого в помещение для обогрева. По причине малой точности более чем трехпозиционные системы применяют редко. Если такое регулирование все же необходимо, то разрабатывают специальные алгоритмы, сводящие процесс регулирования к двухпозиционному. Идея такого специального алгоритма может быть, например, следующая. После включения системы на объект подается максимальное управляющее воздействие X_y . Если температура превысила заданный уровень, то X_y уменьшают на одну ступень. Если температура все же продолжает некоторое время повышаться, то X_y уменьшают еще на одну ступень. Так происходит, пока не возникнет режим автоколебаний в двухпозиционном режиме. При понижении температуры на объекте все происходит в обратном порядке. Выбор времени, по прошествии которого необходимо уменьшать (или увеличивать X_y) можно так же осуществить путем моделирования на ЭВМ.

Контрольные вопросы

1. Что называют позиционными законами регулирования?
2. Изложите режимы работы двух- и трехпозиционных систем.
3. Изложите и поясните методику синтеза позиционных систем с применением моделирования на ЭВМ.

ЗАДАНИЯ К КУРСОВЫМ РАБОТАМ

Цель выполнения курсовой работы – закрепление базовых знаний по курсу «Теория автоматического управления» и формирование у студентов практических навыков исследования систем автоматического управления.

В качестве тем курсовой работы предлагается анализ систем автоматического регулирования сельскохозяйственного назначения: температуры в животноводческих помещениях и теплицах, температуры теплоносителей зерновых сушилок и агрегатов витаминной муки, температуры поливной воды, технологических параметров котлов, скоростного режима обкаточных станков.

Вопросы, подлежащие разработке

1. Дать краткую характеристику объекта управления, описать устройство системы, составить ее функциональную схему. Описать работу системы. Сделать выводы о принципе автоматического управления, использованном в системе, и виде системы.
2. Составить структурную схему системы.
3. Определить закон регулирования системы.
4. Определить передаточные функции системы по управляющему (задающему), возмущающему воздействиям и для ошибок по этим воздействиям.
5. Выполнить анализ устойчивости системы по критериям Гурвица и Найквиста. Определить запасы устойчивости.
6. Проанализировать зависимость статической ошибки системы от изменения управляющего (задающего) воздействия на систему. Сделать вывод о характере этой зависимости.
7. Провести совместный анализ изменения управляемой (регулируемой) величины объекта управления и системы от возмущающего воздействия в статике. Дать их сравнительную оценку. Определить статическую ошибку системы по возмущающему воздействию.

8. Оценить качество управления по переходным функциям.
9. Сделать общие выводы о работе.

Выбор варианта задания и исходных данных

Вариант задания соответствует 2-м последним цифрам номера зачетной книжки, если эти цифры образуют число от 0 до 39. Если эти цифры образуют число от 40 до 79, то для определения варианта необходимо из этого числа вычесть число 40. Если эти цифры образуют число от 80 до 99, то необходимо вычесть число 80.

Руководитель курсовой работы имеет право выдать задание индивидуально.

В таблице *приложения 1* для каждого варианта заданы номер схемы и параметры звеньев системы.

В *приложении 2* приведены схемы системы и краткая характеристика каждой системы.

В *приложении 3* даны уравнения объектов управления. Обозначения параметров в уравнениях соответствуют обозначениям в таблице приложения 1.

В *приложении 4* даны уравнения элементов систем. Обозначения параметров в уравнениях соответствуют обозначениям в таблице приложения 1.

В *приложении 5* приведены графики переходных функций по управляющему («Y № вар.») и возмущающему («F № вар.») воздействиям. Например, Y01 и F01 обозначены переходные функции системы, соответствующие 1-му варианту.

Оформление работы

Работа оформляется на листах бумаги формата А4 с рамкой и штампом (кроме титульного листа). Пример оформления титульного листа приведен ниже.

Работа излагается в следующем порядке.

Титульный лист, содержание, цель работы, задание, разделы работы в соответствии с заданием.

В разделе «Задание» последовательно приводятся задания по пунктам, изложенным в методических указаниях, схема системы и таблица исходных данных.

Под схемой системы дается полное название системы (как оно дано в *приложении 2*). На титульном листе вместо «САР» следует писать «Система автоматического регулирования». Таблица исходных данных приводится так, как она дана в *приложении 1*, и состоит из трех строк. Последняя строка соответствует Вашему варианту задания.

Разделы работы излагаются в порядке, определенном пунктами задания.

Каждый раздел нумеруется и озаглавляется в соответствии с пунктами задания.

Пример оформления титульного листа курсовой работы

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра автоматизированных
систем управления
производством

Курсовая работа

по «Теории автоматического управления»

вариант.....12

студента гр.....1а

Петровского И. И.

АНАЛИЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В КЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ

Руководитель

Ю. А. Сидоренко

Минск, 2011

При оформлении работы нет необходимости излагать теоретические сведения.

В работе необходимо изложить все пояснения по ходу работы, полученные схемы, общий вид математических зависимостей с расшифровкой обозначений (если эти обозначения встречаются в первый раз), зависимости с подставленными численными значениями параметров, результаты расчетов по этим зависимостям (если расчет проводится), необходимые графики.

Схемы должны быть выполнены по правилам выполнения этих схем со всеми обозначениями. Под каждой схемой должны быть даны номер рисунка и полное его название.

Графики выполняются в масштабе, обеспечивающем его наглядность. Оси координат графика должны быть снабжены обозначениями переменных, размерностью переменных и шкалой. На графиках должны быть нанесены точки, по которым он строится. Под графиком должны быть даны номер рисунка и полное название графика.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Анхимюк, В. Л.* Теория автоматического управления / В. Л. Анхимюк, О. Ф. Олейко, Н. Н. Михеев. Минск, 2000.
2. *Сидоренко, Ю. А.* Теория автоматического управления / Ю. А. Сидоренко. Минск, 2007.
3. *Солодовников, В. В.* Основы теории и элементы систем автоматического регулирования / В. В. Солодовников, В. Н. Плотников, А. В. Яковлев. Москва, 1985.
4. СТП БГАТУ 01.12–06. Общие требования к организации проектирования и правила оформления дипломных и курсовых проектов (работ). Минск, 2007.
5. Теория автоматического управления. В 2-х ч. Ч. 1. Теория линейных систем автоматического управления / Н. А. Бабаков [и др.]; под ред. А. А. Воронова. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1986.
6. Теория автоматического управления. В 2-х ч. Ч. 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления / А. А. Воронов [и др.]; под ред. А. А. Воронова. 2-е изд., перераб. и доп. Москва, 1986.
7. *Юревич, Е. Н.* Теория автоматического управления / Е. Н. Юревич. Ленинград, 1975.

1. Варианты заданий

Вариант	Схема	ПАРАМЕТРЫ											
		K_1	K_2	T_1, c	K_d	T_d, c	K_y	$K_{дв}$	K_p	K_B	K_{II}	K_M	$T_{дв}, c$
00	16	0,5	1	600	0,4	30	10	0,017	0,1	25	1	-	0,5
01	7	0,2	1	400	0,2	10	25	0,004	0,1	25	-	0,4	0,5
02	11	1	1	170	0,4	7	50	0,018	0,1	50	1	0,2	0,5
03	1	0,1	0,01	-	0,5	0,4	50	0,001	0,2	10	1	-	0,5
04	4	1,2	0,4	5	0,2	0,2	40	0,25	0,1	10	0,1	-	0,5
05	2	0,1	0,5	100	0,3	1	50	0,02	0,2	50	0,1	-	0,5
06	10	10	1	100	0,4	10	10	0,001	0,1	25	-	0,2	0,5
07	9	2	1	150	0,2	8	33	-	$T_2=14$	-	-	0,3	-
08	5	0,5	0,4	5	0,2	0,2	40	0,03	0,2	50	-	-	0,5
09	6	0,2	1	200	0,4	10	10	2	-	10	-	0,5	3
10	3	0,1	0,5	100	0,5	1	10	0,005	0,2	40	-	-	0,5
11	18	30	0,6	70	0,2	10	100	0,035	0,1	0,1	2	-	0,5
12	8	0,1	1	200	0,4	10	25	0,04	0,1	40	0,4	1	0,5
13	20	50	0,4	4	0,1	0,1	50	0,002	0,1	5	5	-	0,5
14	12	30	1	80	1	4	4	0,025	0,1	0,1	-	-	0,5
15	13	30	1	80	0,4	4	20	0,31	0,1	0,1	0,2	-	0,5
16	17	30	0,6	70	0,4	10	25	0,01	0,1	0,1	-	-	0,5
17	15	2	1	20	0,2	2	50	0,062	0,2	50	2	0,5	0,5
18	14	1	1	20	0,2	2	20	0,01	0,1	50	-	0,5	0,5
19	19	100	1	25	0,2	2	5	0,04	0,2	1	6,2	-	0,5
20	2	0,5	0,5	5050	0,2	0,5	80	0,025	0,2	75	0,1	-	0,5
21	3	0,05	0,5	160	0,4	0,5	25	0,02	0,1	30	-	-	0,5
22	13	8	1	200	0,5	8	30	0,11	0,3	0,5	0,1	-	0,5
23	7	0,2	1	400	0,4	15	10	0,025	0,2	5	-	0,5	0,5
24	8	1	1	300	0,2	10	10	0,03	0,1	30	1	1	0,5
25	6	0,4	1	100	0,2	15	50	1	-	15	-	0,1	5
26	18	20	0,7	200	0,4	10	70	0,033	0,1	0,1	0,2	-	0,5
27	10	5	1	3	0,2	14	25	0,002	0,2	10	-	0,1	0,5
28	4	2	0,4	160	0,1	0,3	60	0,08	0,1	20	0,2	-	0,5
29	12	10	1	8	5	8	6	0,001	0,2	0,1	-	-	0,5
30	20	25	0,4	40	0,1	0,1	10	0,01	0,1	5	2	-	0,5
31	14	2	1	500	0,4	5	4	0,02	0,2	31	-	0,1	0,5
32	9	1	1	140	0,2	12	400	-	$T_2=33$	-	-	0,1	-
33	11	2	1	100	0,4	7	100	0,017	0,1	25	0,5	0,1	0,5
34	17	20	0,7	40	0,1	10	50	0,02	0,1	0,1	-	-	0,5
35	15	5,3	1	2,5	0,2	5	10	0,063	0,2	10	1	0,1	0,5
36	5	0,8	0,4	50	0,1	0,3	45	0,05	0,1	10	-	-	0,5
37	19	50	1	-	0,2	3	40	0,01	0,2	0,9	2	-	0,5
38	1	0,2	0,02	900	0,2	0,5	5	0,005	0,1	50	2	-	0,5
39	16	0,4	1		0,2	40	50	0,002	0,2	40	0,5	-	0,5

ПРИЛОЖЕНИЯ

2. Схемы к заданиям по курсовой работе

САР уровня воды в барабане котла

Система обеспечивает поддержание уровня воды в верхнем барабане котла в требуемых пределах. К системе предъявляются высокие требования, поскольку снижение уровня или перепитка котла водой могут привести к серьезным авариям: перегосу экранных труб или забросу воды в магистральный паропровод. Уровень регулируется за счет изменения расхода питающей воды, поступающей в барабан котла. Основное возмущающее воздействие на котел – изменение расхода пара (изменение нагрузки котла). Датчик уровня – дифманометр с дифтрансформаторным преобразователем сигнала. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

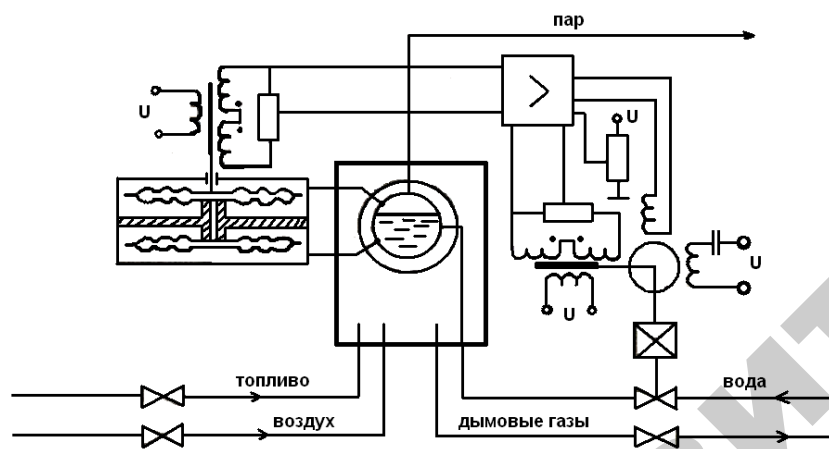


Схема 1

САР давления пара в барабане котла

Система поддерживает на заданном уровне давление пара в барабане котла, что необходимо по условиям экономичности и безопасно-

сти работы котлоагрегата. Давление регулируется путем изменения подачи топлива в топку. Основное возмущающее воздействие – изменение расхода пара (изменение нагрузки котла). Датчик давления – манометр с дифтрансформаторным преобразователем сигнала. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

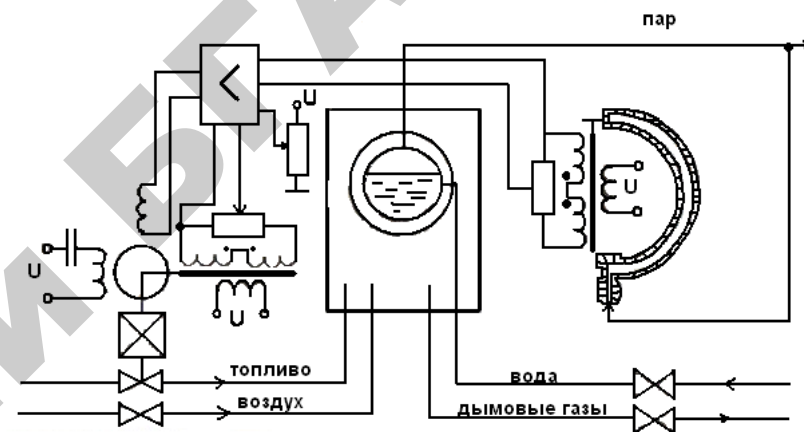


Схема 2

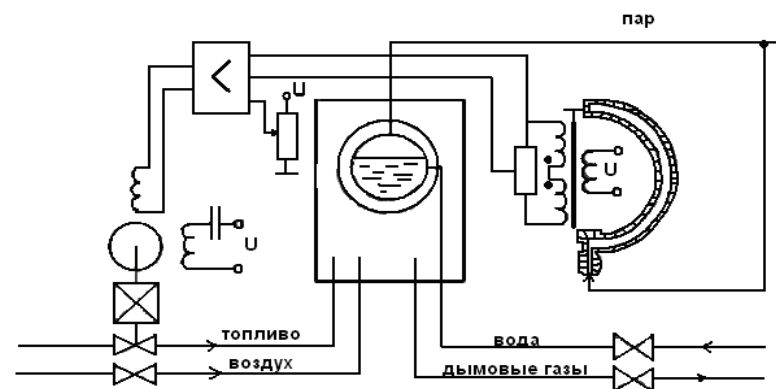


Схема 3

САР разрежения в топке

Система стабилизирует разрежение в верхней части топки, что необходимо для нормального топочного режима. Разрежение регу-

лируется за счет изменения производительности дымососа с помощью поворотных заслонок. Основное возмущающее воздействие – изменение расхода воздуха, поступающего в топку. Датчик разрежения – дифтигومتر, соединенный с верхней частью топки. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

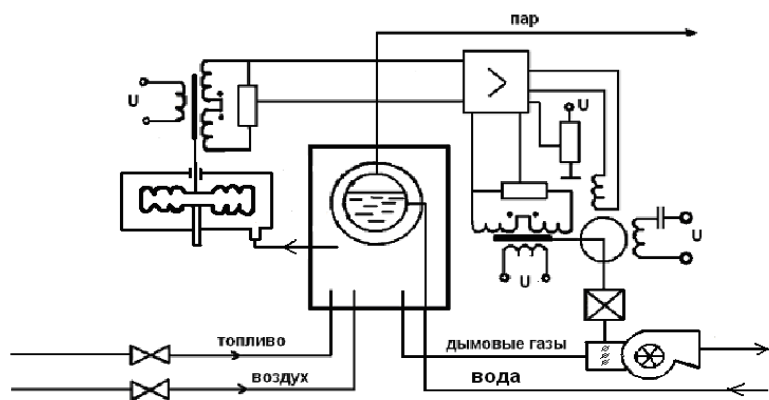


Схема 4

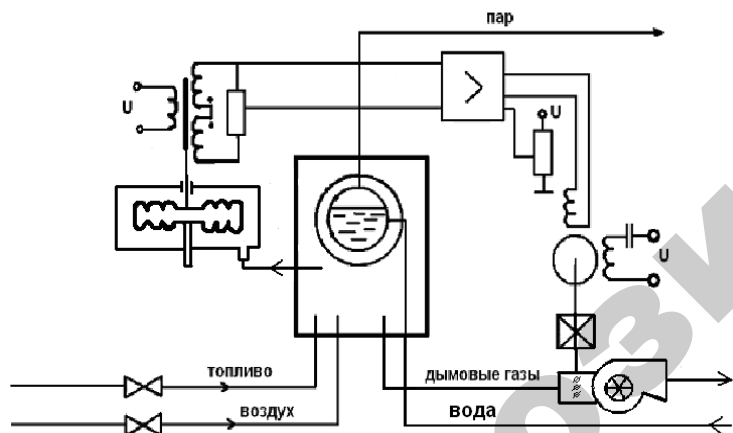


Схема 5

САР температуры воздуха в птичнике в летний период

Система стабилизирует температуру воздуха за счет изменения воздухообмена. Воздухообмен регулируется изменением частоты вращения вытяжных вентиляторов. Основное возмущающее воздействие – колебание температуры наружного воздуха. Датчик температуры – термометр сопротивления. Устройство сравнения является мост. Система импульсно-фазового управления (СИФУ) совместно с тиристорным блоком и предварительным усилителем образуют управляемый усилитель.

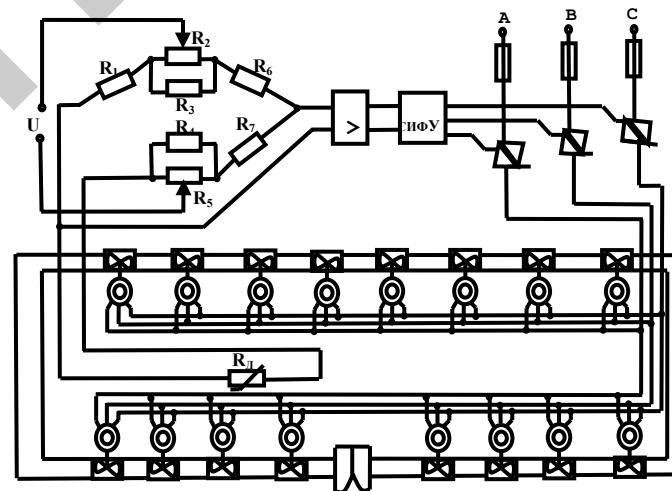


Схема 6

САР температуры в животноводческом помещении

Система стабилизирует температуру в помещении в зимний период за счет изменения температуры приточного воздуха, которая регулируется путем изменения расхода горячей воды через водяной калорифер. Основное возмущающее воздействие – изменение тем-

пературы наружного воздуха. Датчик температуры воздуха внутри помещения – термометр сопротивления. Устройством сравнения является мост.

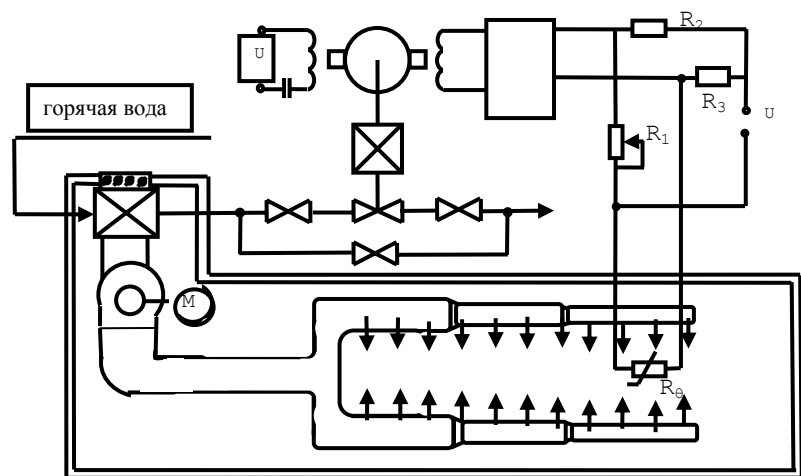


Схема 7

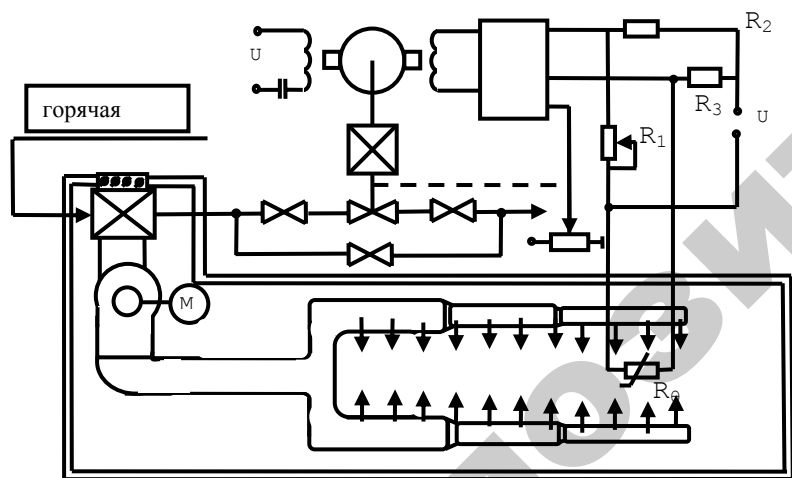


Схема 8

САР температуры в животноводческом помещении

Система стабилизирует температуру в помещении за счет изменения мощности, подаваемой на установленный в приточном воздуховоде электрокалорифер. Датчик температуры – термометр сопротивления. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Устройством сравнения является мост. Система импульсно-фазового управления (СИФУ) совместно с тиристорным блоком и предварительным усилителем образуют управляемый усилитель.

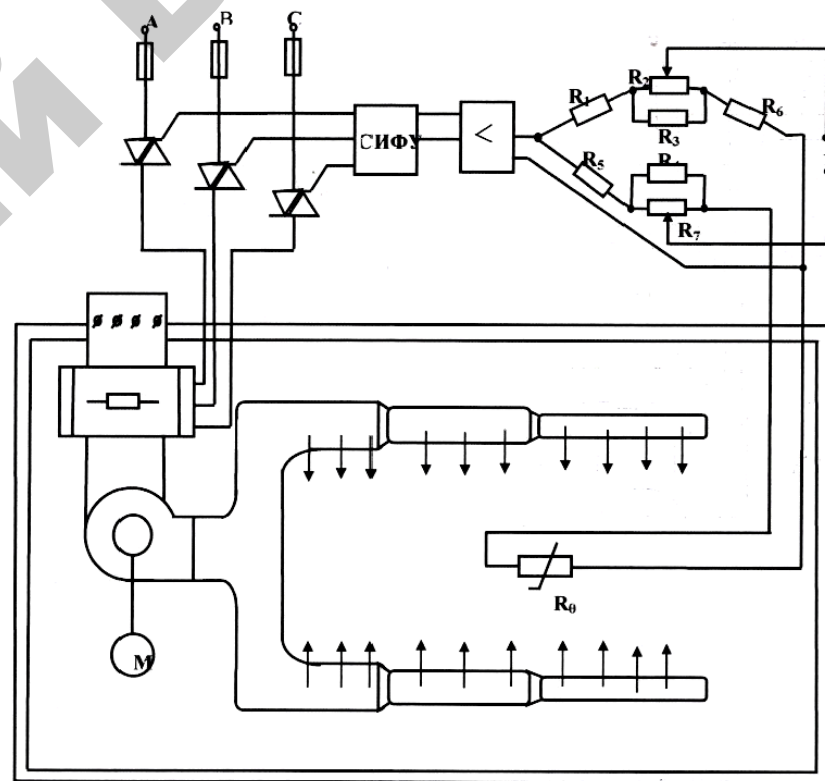


Схема 9

САР температуры приточного воздуха в картофелехранилище

Система стабилизирует температуру приточного воздуха, которым вентилируется в периоды охлаждения холодного и зимнего хранения. Температура регулируется путем смешивания холодного воздуха, поступающего через приточную шахту, с более теплым внутренним воздухом хранилища. Смешение наружного и внутреннего воздуха осуществляется клапаном, установленным в приточном канале. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Датчик температуры – термометр сопротивления. Устройством сравнения является мост.

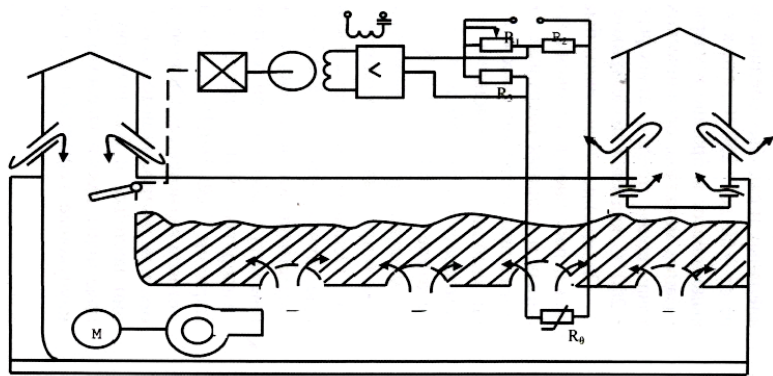


Схема 10

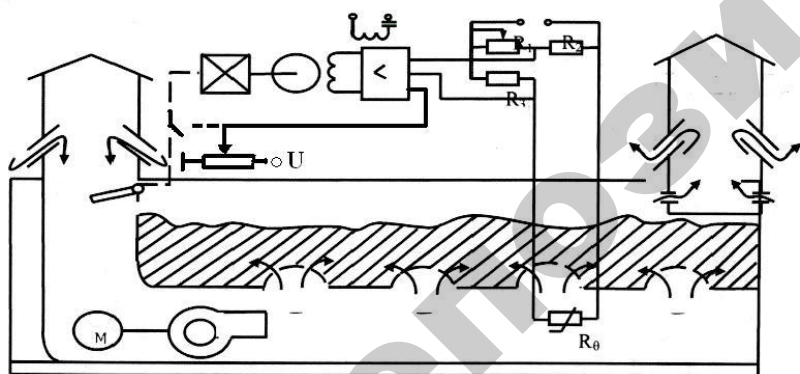


Схема 11

САР температуры теплоносителя в агрегате АВМ

Система стабилизирует температуру теплоносителя на выходе из сушильного барабана. Температура регулируется путем изменения количества топлива, подаваемого насосом 1 в теплогенератор 2. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха и влажности высушиваемого продукта. Датчик температуры – термопара. Устройством сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

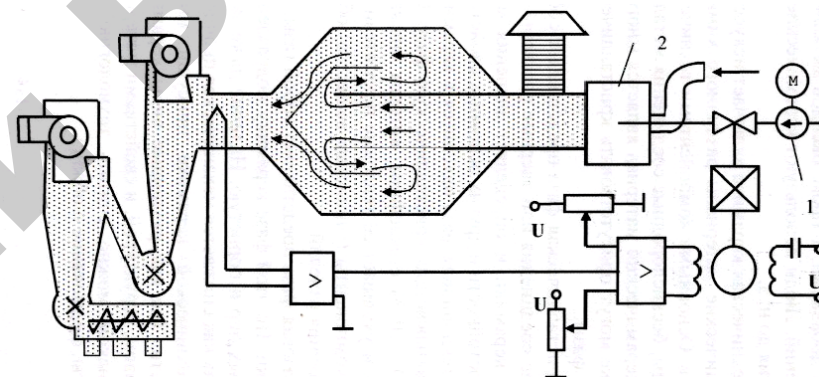


Схема 12

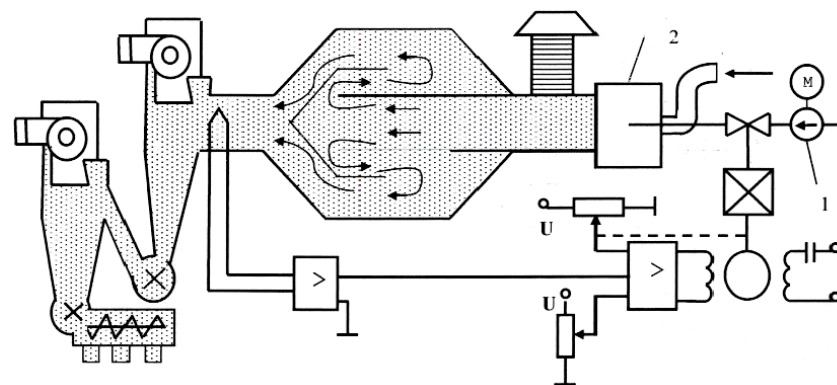


Схема 13

САР температуры теплоносителя в шахтной зерносушилке

Система стабилизирует температуру теплоносителя, образованного смесью атмосферного воздуха (Q_a) с топочными газами (Q_r). Температура регулируется путем изменения соотношения расходов атмосферного воздуха топочных газов с помощью повторной заслонки. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Датчик температуры – термометр сопротивления, установленный в канале теплоносителя перед входом в сушилку. Устройством сравнения является мост.

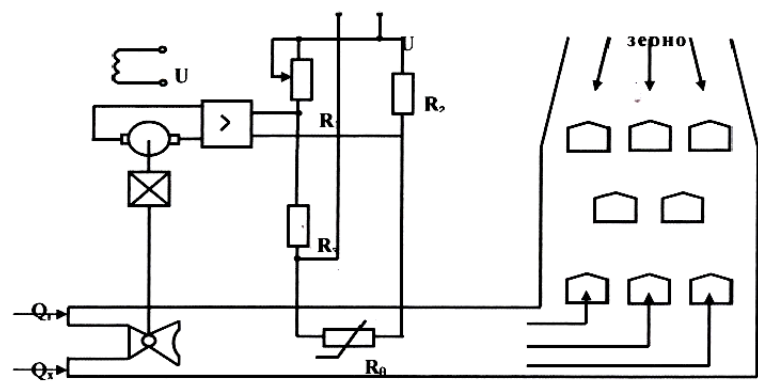


Схема 14

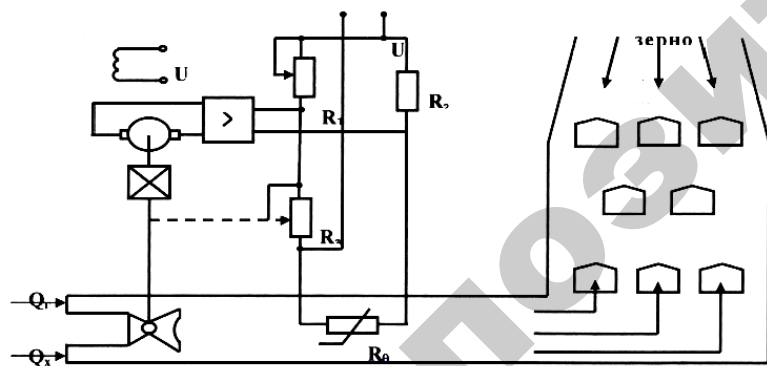


Схема 15

САР температуры воздуха в теплице

Система стабилизирует температуру воздуха в остекленных блочных теплицах с водяной системой обогрева. Температура воздуха регулируется за счет изменения температуры теплоносителя с помощью смесительного клапана. Основное возмущающее воздействие – изменение температуры наружного воздуха. Датчик температуры воздуха в теплице – термометр сопротивления. На схеме: 2 – измерительный блок, преобразующий величину сопротивления датчика температуры в электрическое напряжение. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

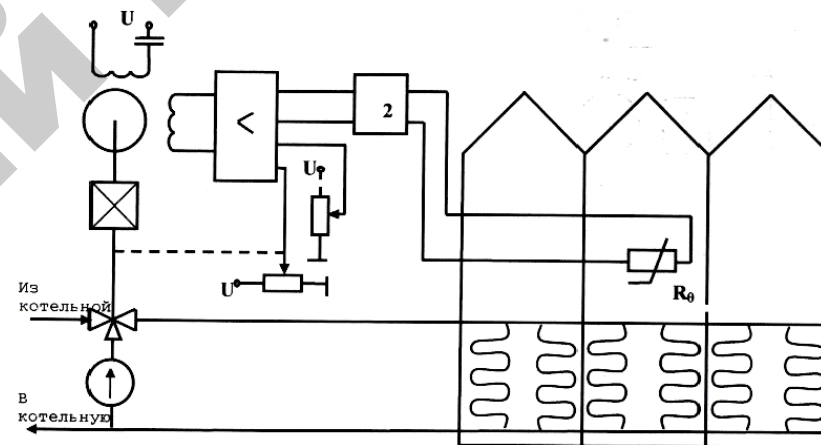


Схема 16

САР температуры воздуха в теплице в летний период

Система стабилизирует температуру воздуха в остекленных блочных теплицах в летний период. Температура воздуха регулируется открытием фрамуг. Основное возмущающее воздействие – изменение интенсивности солнечной радиации. Датчик температуры воздуха в теплице – термометр сопротивления. На схеме: 2 – измерительный блок, преобразующий величину сопротивления датчика температуры в электрическое напряжение. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

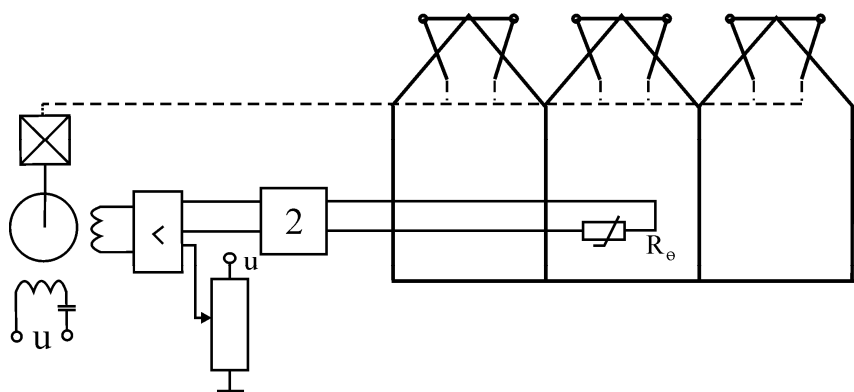


Схема 17

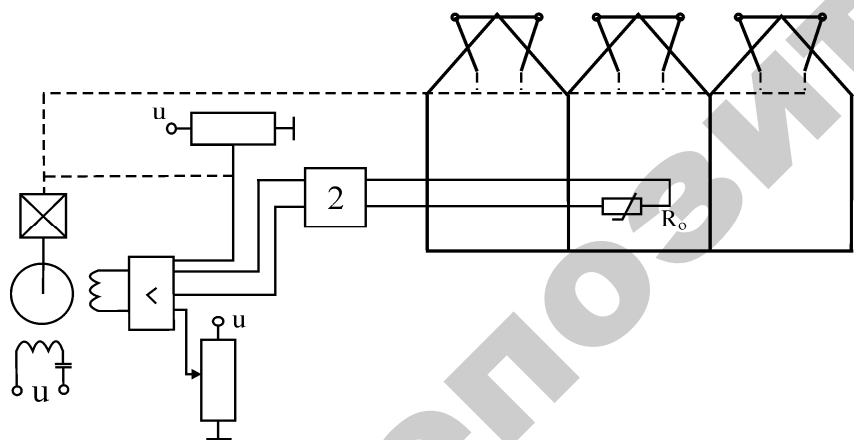


Схема 18

САР температуры поливной воды в теплице

Температура поливной воды регулируется путем изменения расхода горячей воды через водонагреватель. Возмущающее воздействие – колебание расхода поливной воды, изменение температуры холодной воды, поступающей из котельной. Датчик температуры поливной воды – термометр сопротивления. На схеме: 2 – измерительный блок, преобразующий величину сопротивления датчика температуры в электрическое напряжение. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

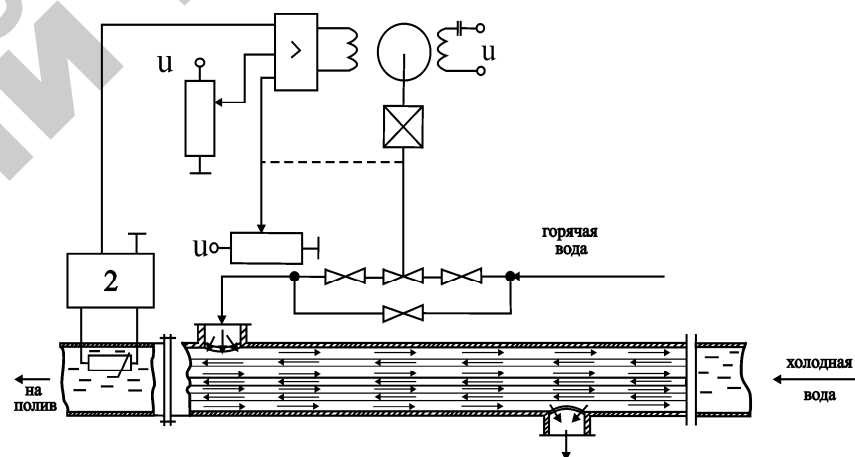


Схема 19

САР частоты вращения электродвигателя стэнда для обкатки ДВС

Система стабилизирует частоту вращения приводного асинхронного электродвигателя с фазным ротором, с помощью которого производится обкатка ДВС. Частота вращения регулируется путем изменения сопротивления в цепи ротора с помощью регулируемого жидкостного реостата 1. Основное возмущающее воздействие – изменение момента сопротивления на вале ДВС в процессе приработки при холодной обкатке. Датчиком регулируемой величины является тахогенератор постоянного тока. Устройство сравнения выполнено на дифференциальном усилителе.

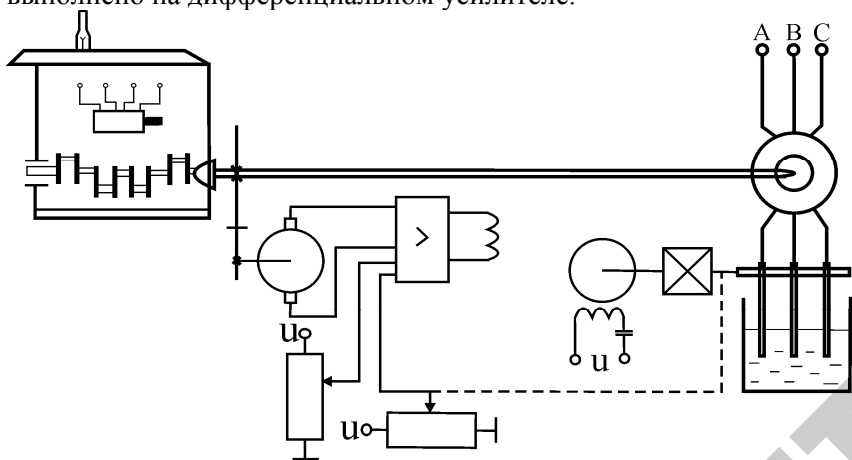


Схема 20

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Уравнения объектов управления

1. Паровой котел как объект регулирования уровня воды в барабане:

$$\frac{dH}{dt} = K_1 \cdot Q_B - K_2 \cdot Q_{\Pi},$$

где H – уровень воды, м;

Q_B – расход воды в котел, т/ч;

Q_{Π} – расход пара, т/ч.

2. Паровой котел как объект регулирования давления пара в барабане:

$$T_1 \frac{dP}{dt} + P = K_1 \cdot Q_T - K_2 \cdot Q_{\Pi},$$

где P – давление пара в барабане, Па;

Q_T – расход топлива, м³/с;

Q_{Π} – расход пара, т/ч.

3. Топка котла как объект регулирования разряжения:

$$T_1 \frac{dP_T}{dt} + P_T = K_1 \cdot Q_D - K_2 \cdot Q_B,$$

где P_T – разряжение в топке, Па;

Q_D – производительность дымососа, м³/с;

Q_B – расход воздуха в топку, м³/с.

4. Сельскохозяйственное помещение как объект регулирования температуры с помощью приточной вентиляции:

а) с водокалорифером

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta_T = K_1 \cdot Q_B + K_2 \cdot \theta_H;$$

б) с электрокалорифером

$$T_1 \cdot T_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + (T_1 + T_2) \cdot \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot P_n + K_2 \cdot \theta_n,$$

где θ – температура воздуха в помещении, °С;

θ_n – температура наружного воздуха, °С;

P_n – электрическая мощность, подаваемая на электрокалорифер, кВт.

5. Птичник как объект регулирования температуры с помощью вытяжной вентиляции:

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot L + K_2 \cdot \theta_n,$$

где θ – температура воздуха в птичнике, °С;

θ_n – температура наружного воздуха, °С;

L – воздухообмен, м³/ч.

6. Теплица как объект регулирования температуры воздуха:

а) с системой водяного отопления

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot \theta_b + K_2 \cdot \theta_n;$$

б) с системой вентиляции

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot \phi_\phi + K_2 \cdot E,$$

где θ – температура воздуха в птичнике, °С;

θ_n – температура наружного воздуха, °С;

E – интенсивность солнечной радиации, клк;

θ_b – температура горячей воды в системе отопления, °С;

ϕ_ϕ – угол открытия фрамуг, рад.

7. Водонагреватель скоростной:

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot Q_b + K_2 \cdot \theta_x,$$

где θ – температура воды на выходе из водонагревателя, °С;

θ_x – температура холодной воды на входе в водонагреватель, °С;

Q_b – расход горячей воды, проходящей через нагреватель, м³/ч.

8. Сушильный барабан агрегата АВМ (вместе с теплогенератором):

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot Q_T + K_2 \cdot \theta_n,$$

где θ – температура теплоносителя на выходе из барабана, °С;

θ_n – температура наружного воздуха, °С;

Q_T – подача топлива в теплогенератор, т/ч.

9. Канал теплоносителя в шахтной зерносушилке:

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot Q_o + K_2 \cdot \theta_n,$$

где θ – температура теплоносителя на выходе из канала, °С;

θ_n – температура наружного воздуха, °С;

Q_o – степень смешивания холодного воздуха и горячих газов на входе в канал, %.

10. Канал приточного воздуха в картофелехранилище:

$$T_1 \frac{d\theta}{dt} + \theta = K_1 \cdot Q_o + K_2 \cdot \theta_n,$$

где θ – температура теплоносителя на выходе из канала, °С;

θ_n – температура наружного воздуха, °С;

Q_o – степень смешивания холодного и рециркуляционного воздуха на входе в канал, %.

11. Трехфазный асинхронный электродвигатель с фазным ротором:

$$T_1 \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_1 \cdot R_\phi - K_2 \cdot M_c,$$

где ω – частота вращения ротора, с^{-1} ;

R_{ϕ} – сопротивление между фазными обмотками ротора, Ом;

M_c – момент сопротивления на вале ротора, Н·м.

12. Электродвигатель постоянного тока с якорным управлением:

$$T_{\text{дв}} \frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{d\phi}{dt} = K_{\text{дв}} \cdot U,$$

где U – напряжение управления, В;

ϕ – угол поворота выходного вала, рад.

1. Манометр, дифманометр, дифтягометр (с дифтрансформаторным преобразователем) для измерения, соответственно, давления жидкости или газа, уровня жидкости и разрежения:

$$T_{\text{д}} \frac{dU_{\text{м}}}{dt} + U_{\text{м}} = K_{\text{д}} \cdot X,$$

где X – измеряемая величина: давление P , уровень H , разрежение $P_{\text{т}}$;

$U_{\text{м}}$ – амплитуда выходного напряжения преобразователя, В.

2. Термометр сопротивления платиновый или медный:

а) $T_{\text{д}} \frac{dR}{dt} + R = K_{\text{д}} \cdot \theta;$

б) совместно с измерительным блоком

$$T_{\text{д}} \frac{dU}{dt} + U = K_{\text{д}} \cdot \theta,$$

где θ – измеряемая температура, $^{\circ}\text{C}$;

R – сопротивление датчика, Ом;

U – выходное напряжение измерительного блока, В.

3. Термопара (вместе с измерительным усилителем):

$$T_{\text{д}} \frac{dU_{\text{т}}}{dt} + U_{\text{т}} = K_{\text{д}} \cdot \theta,$$

где θ – измеряемая температура, $^{\circ}\text{C}$;

$U_{\text{т}}$ – выходное напряжение измерительного усилителя, В.

4. Тахогенератор постоянного тока (вместе с приводным редуктором):

$$T_{\text{д}} \frac{dU_{\text{тр}}}{dt} + U_{\text{тр}} = K_{\text{д}} \cdot \omega,$$

где ω – измеряемая частота вращения, с^{-1} ;
 $U_{\text{тр}}$ – выходное напряжение, В.

5. Смесительный вентиль для жидкостей:

$$\theta_{\text{в}} = K_{\text{в}} \cdot \varphi,$$

где $\theta_{\text{н}}$ – температура жидкости после смесителя, $^{\circ}\text{C}$;
 φ – угол поворота регулирующего элемента вентиля, рад.

6. Измерительная мостовая схема:

$$U_{\text{м}} = K_{\text{м}} \cdot (R_0 - R_{\text{д}}),$$

где R_0 – сопротивление резистора-задатчика, Ом;
 $R_{\text{д}}$ – сопротивление измерительного резистора (датчика контролируемой величины), Ом;
 $U_{\text{м}}$ – выходное напряжение (на переменном токе – амплитуда выходного напряжения), В.

7. Электронный усилитель постоянного и переменного тока:

$$U_2 = K_{\text{у}} \cdot U_1,$$

где U_2 – амплитуда выходного напряжения.

8. Тиристорный регулятор: а) напряжения; б) мощности (вместе с предусилителем):

$$\text{а) } U_{\text{т}} = K_{\text{у}} \cdot U_{\text{вх}};$$

$$\text{б) } P_{\text{т}} = K_{\text{у}} \cdot U_{\text{вх}},$$

где $U_{\text{т}}$ и $U_{\text{вх}}$ – входное и выходное напряжения, В;
 $P_{\text{т}}$ – выходная мощность, Вт.

9. Двухфазный асинхронный электродвигатель с амплитудным управлением:

$$T_{\text{дв}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = K_{\text{дв}} \cdot U_{\text{м}},$$

89

где $U_{\text{м}}$ – амплитуда напряжения управления, В;
 φ – угол поворота выходного вала, рад.

10. Трехфазный регулируемый асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором:

$$T_{\text{дв}} \frac{d\omega}{dt} + \omega = K_{\text{дв}} \cdot U,$$

где U – фазное напряжение питания электродвигателя, В;
 ω – угловая частота вращения ротора, с^{-1} .

11. Электродвигатель постоянного тока с якорным управлением:

$$T_{\text{дв}} \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{d\varphi}{dt} = K_{\text{дв}} \cdot U,$$

где U – напряжение управления, В;
 φ – угол поворота выходного вала, рад.

12. Редуктор, рычажный механизм передачи:

$$\text{а) } S_2 = K_{\text{р}} \cdot S_1;$$

$$\text{б) } \varphi_2 = K_{\text{р}} \cdot \varphi_1,$$

где S_1, S_2 – входное и выходное перемещения, м;
 φ_1, φ_2 – входной и выходной углы поворота, рад.

13. Преобразователь перемещения или угла поворота дифтрансформаторный:

$$U_{\text{м}} = K_{\text{п}} \cdot S; U_{\text{м}} = K_{\text{п}} \cdot \varphi,$$

где S , м, и φ , рад, – измеряемые перемещение и угол поворота;
 $U_{\text{м}}$ – амплитуда выходного напряжения, В.

90

14. Осевой вентилятор:

$$L = K_B \cdot \omega,$$

где ω – угловая частота вращения;
 L – производительность, м³/ч.

15. Фрамуги в теплице:

$$\varphi_\Phi = K_B \cdot \varphi_p,$$

где φ_Φ – угол открытия фрамуг, рад;
 φ_p – угол поворота приводного редуктора, рад.

16. Регулируемый вентиль для жидкостей и газов:

$$Q = K_B \cdot S; \quad Q = K_B \cdot \varphi,$$

где S , м, и φ , рад, – перемещение и угол поворота регулирующего элемента вентиля;

Q – расход жидкости или газа через вентиль, м³/с.

17. Дымосос:

$$Q_d = K_B \cdot \varphi,$$

где φ – угол поворота дроссельных заслонок, рад;
 Q_d – производительность дымососа, м³/с.

18. Смесительный клапан для воздуха и газов:

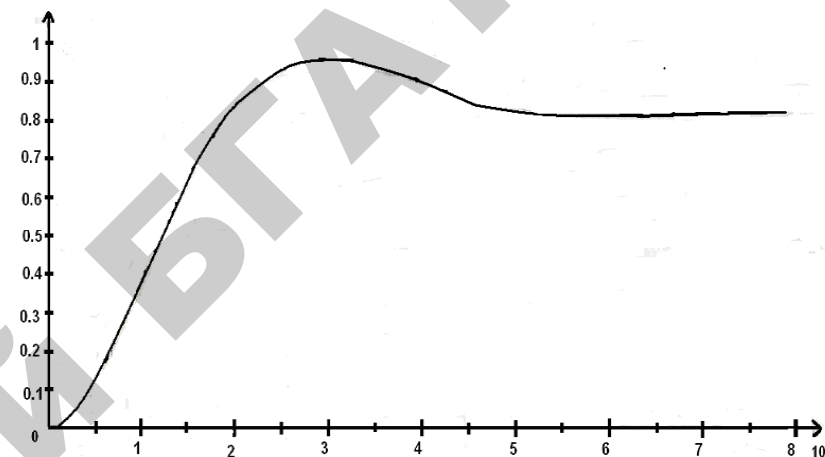
$$Q_0 = K_B \cdot \varphi_3,$$

где φ_3 – угол поворота заслонки клапана, рад;
 Q_0 – степень смешивания воздуха и газов, %.

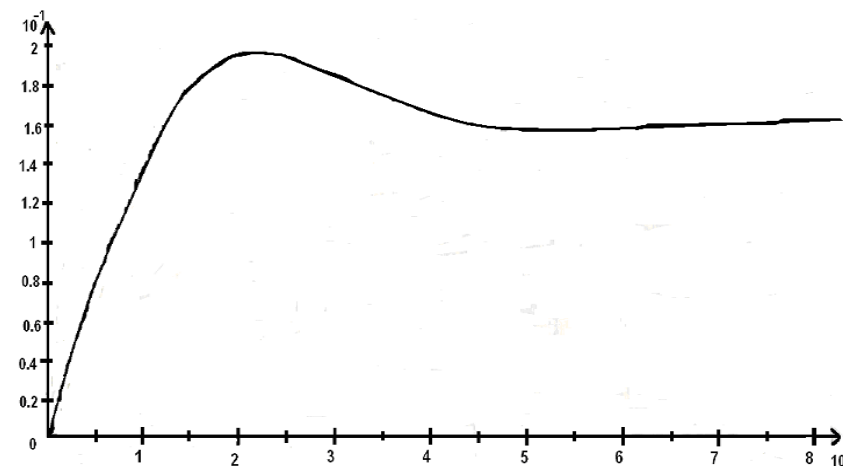
19. Жидкостный реостат:

$$R_\Phi = K_B \cdot \varphi,$$

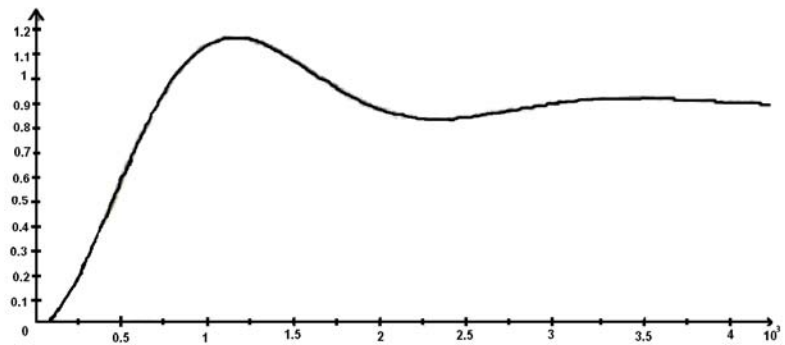
где φ – угол поворота пластин реостата, рад;
 R_Φ – сопротивление между фазными обмотками ротора управляемого двигателя, Ом.



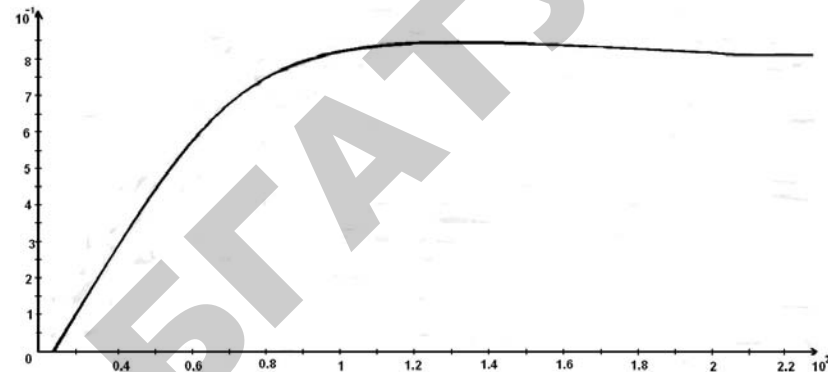
Y00



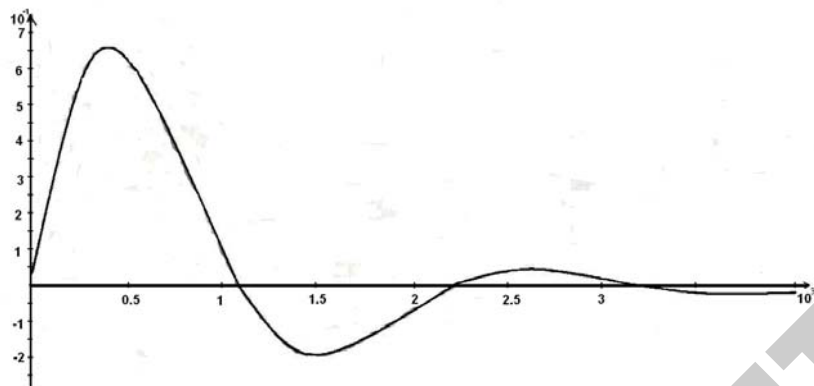
F00



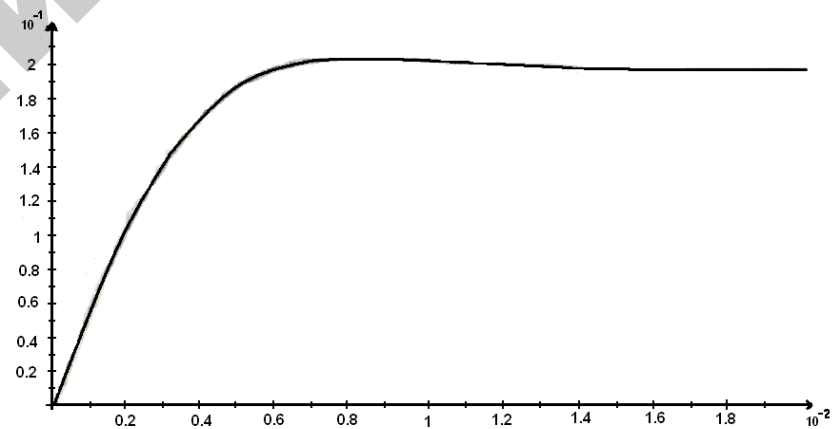
Y01



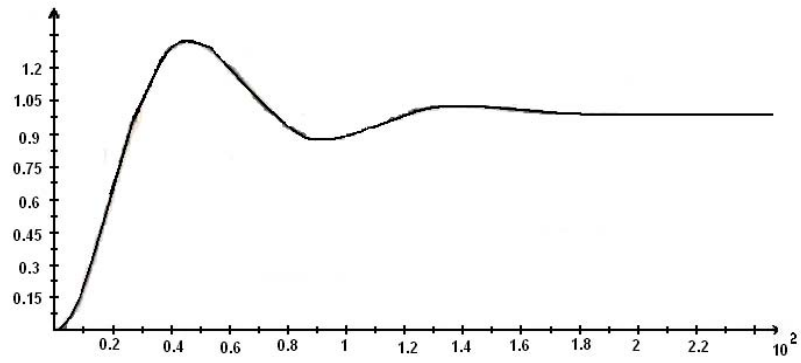
Y02



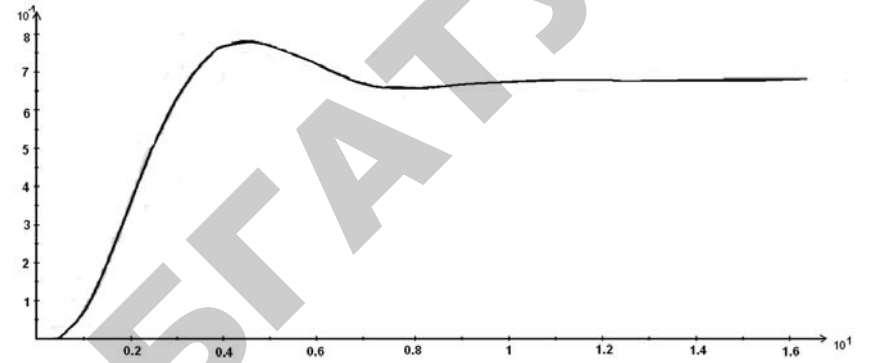
F01



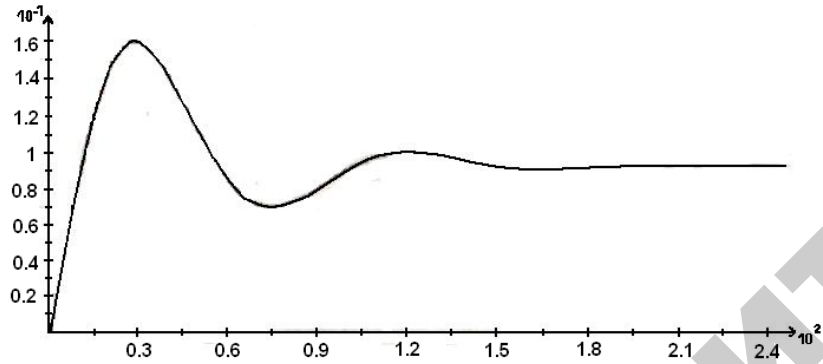
F02



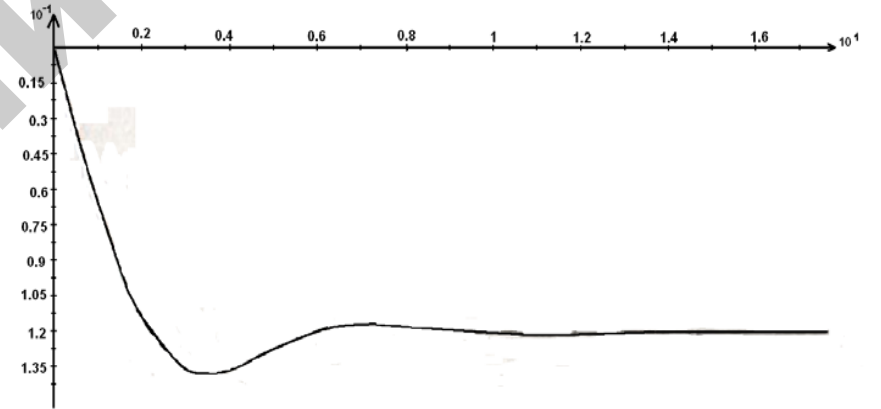
Y03



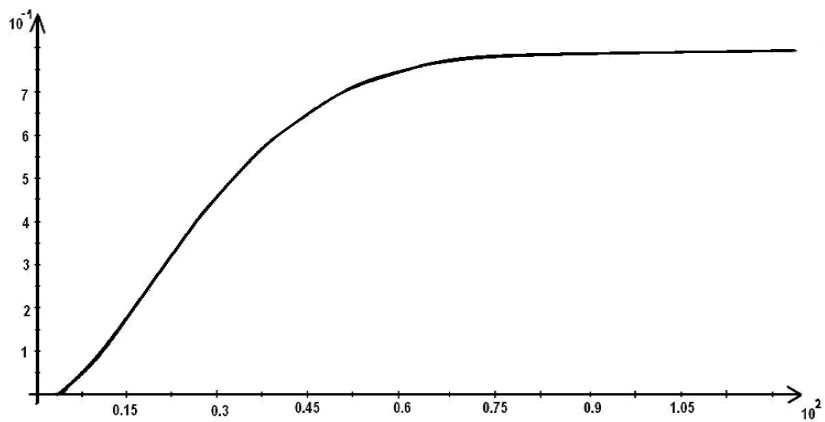
Y04



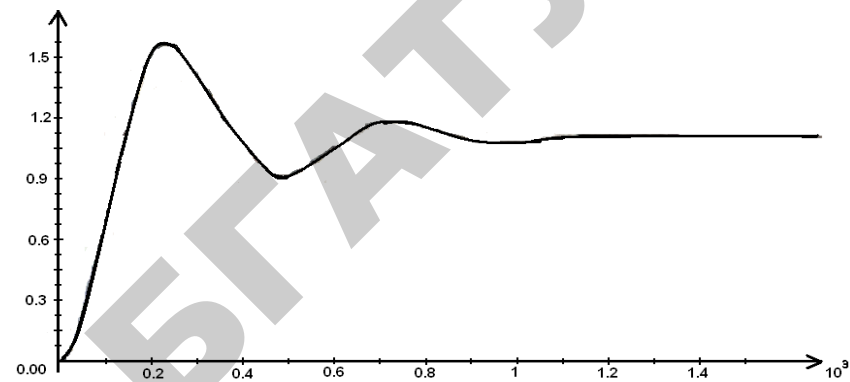
F03



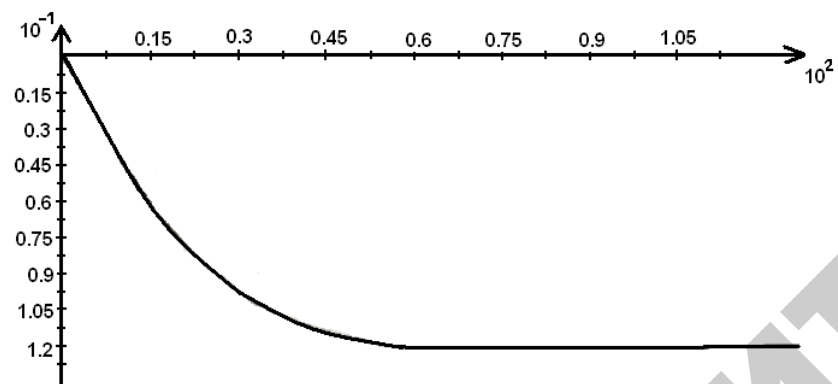
F04



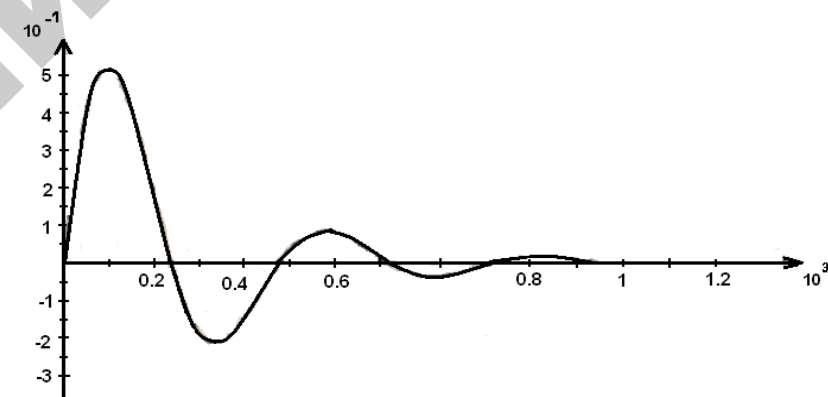
Y05



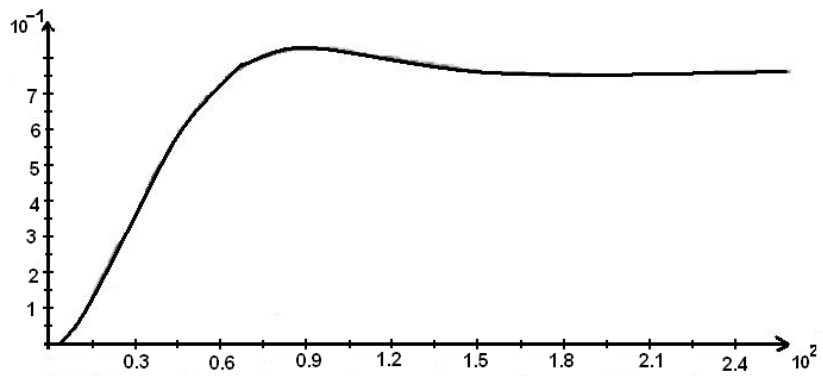
Y06



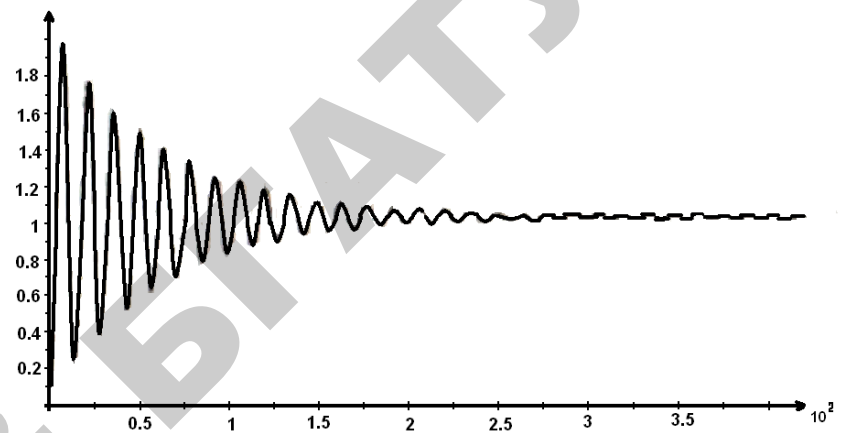
F05



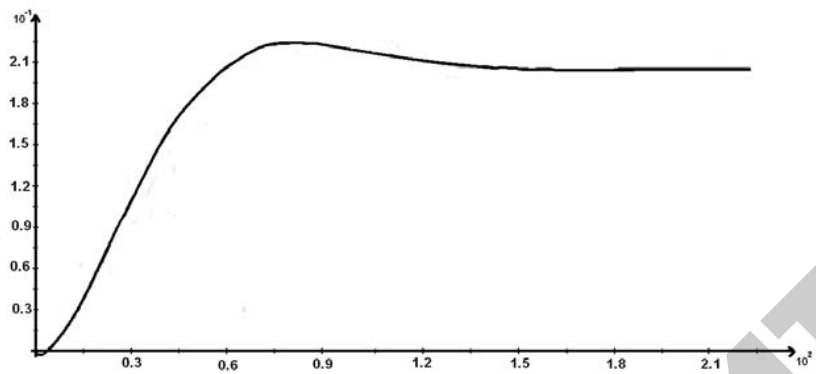
F06



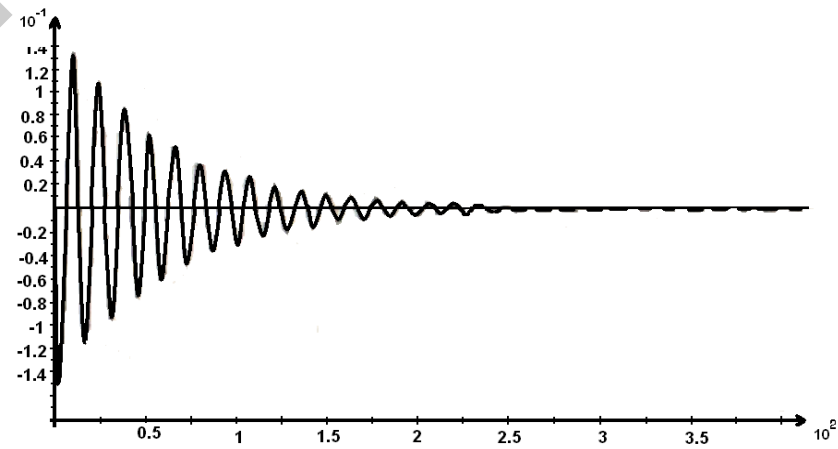
Y07



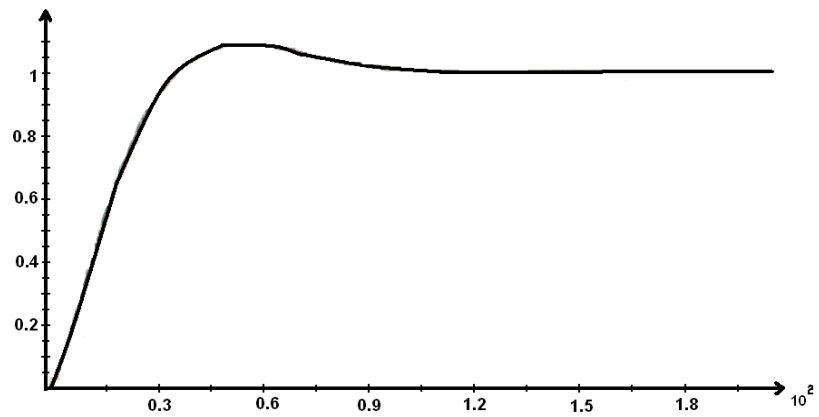
Y08



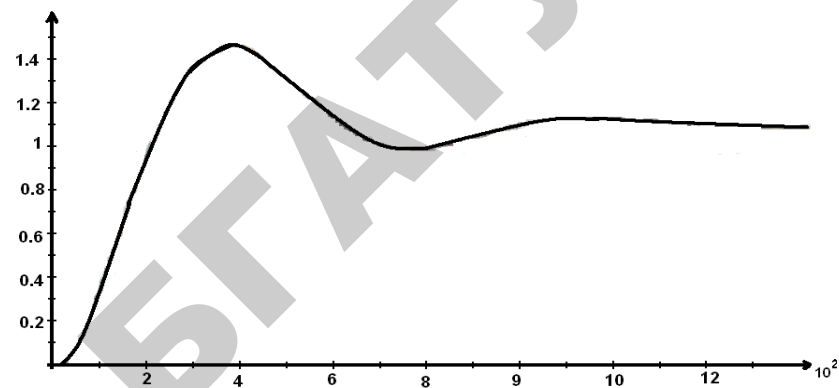
F07



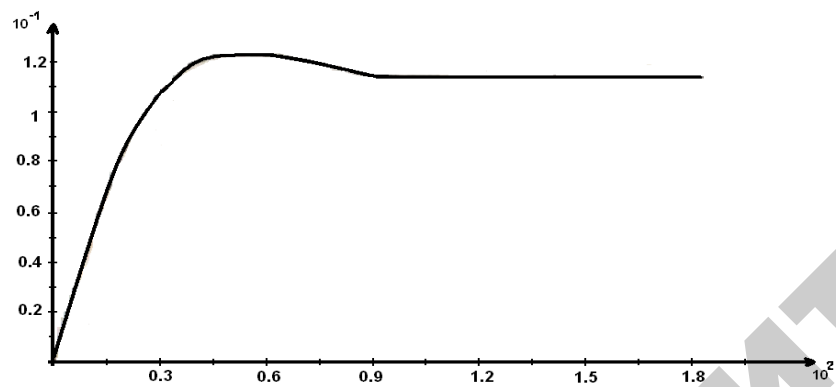
F08



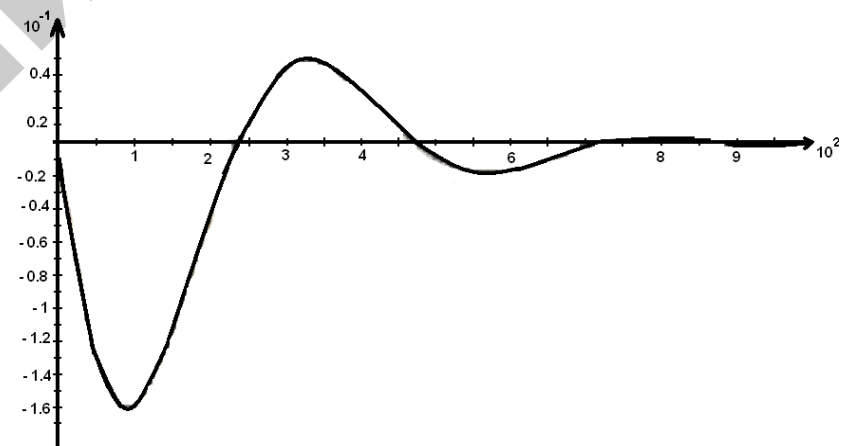
Y09



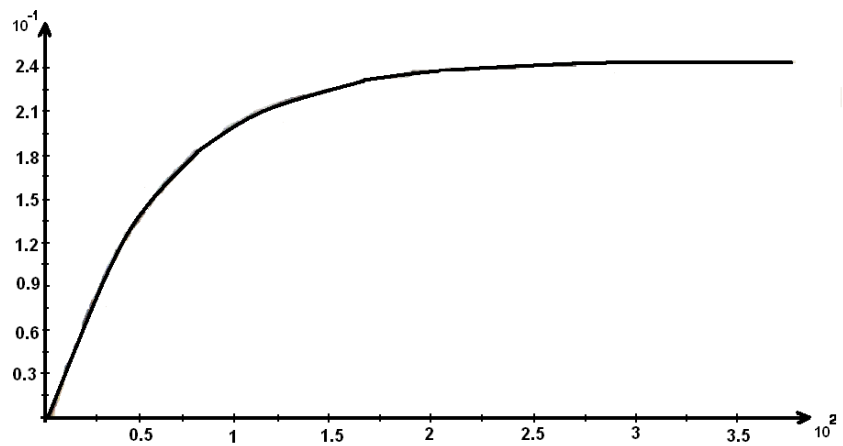
Y10



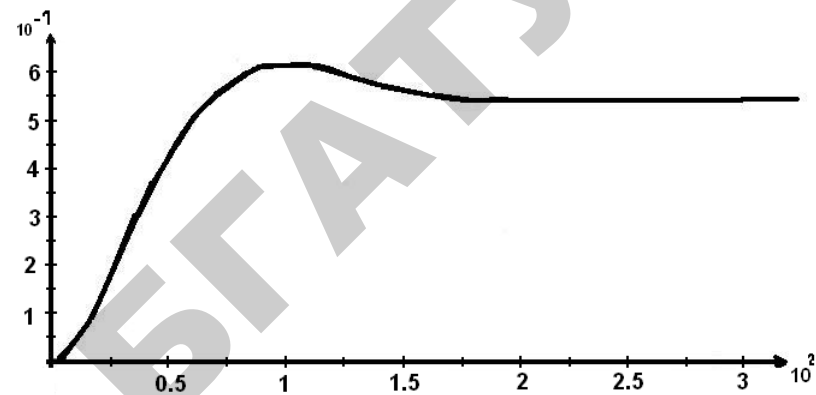
F09



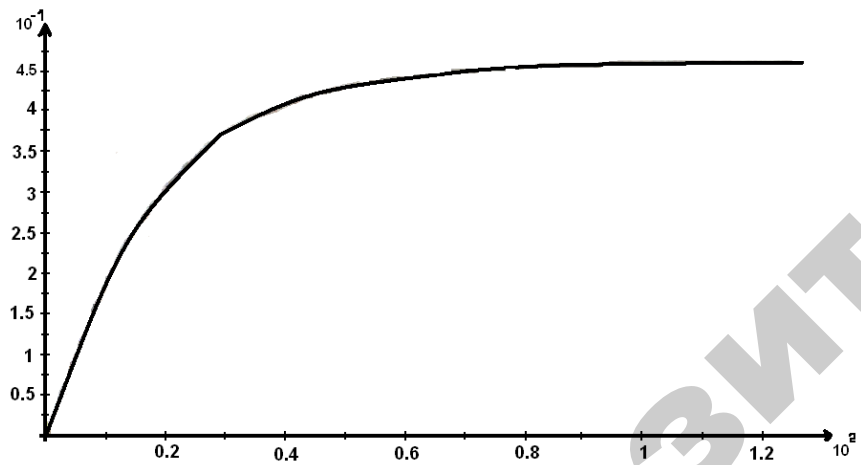
F10



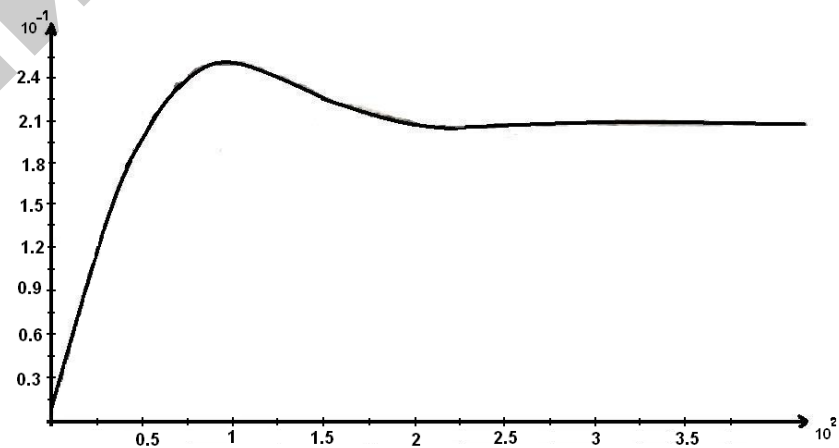
Y11



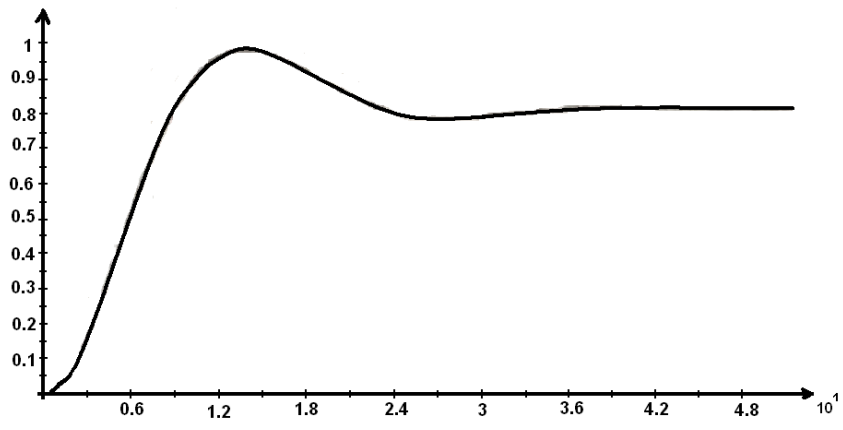
Y12



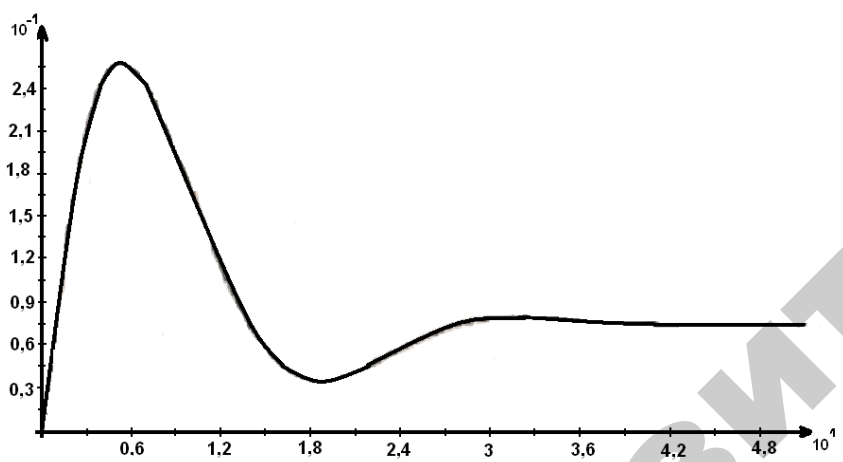
F11



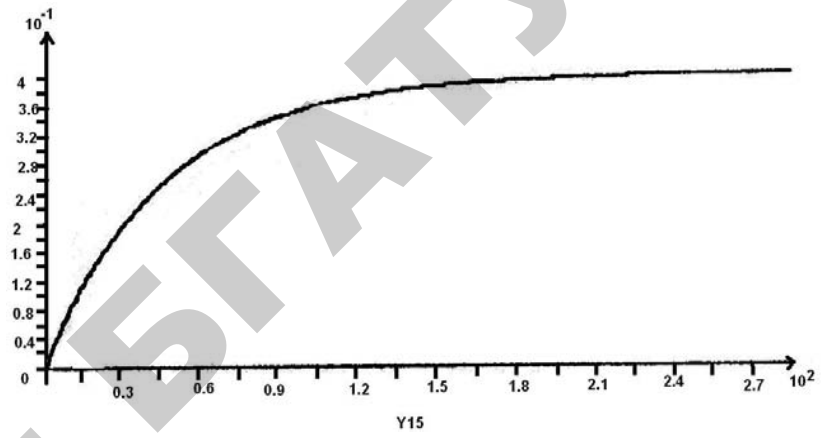
F12



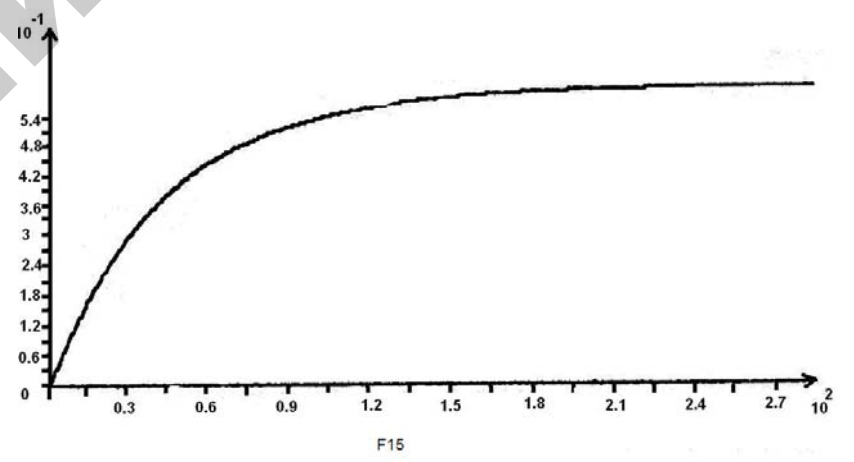
Y13



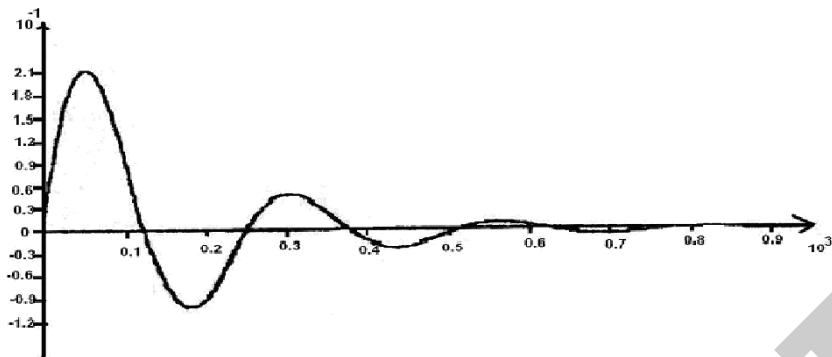
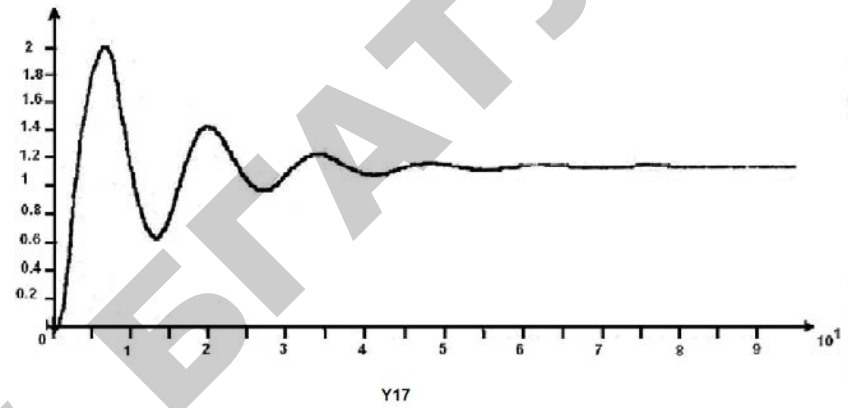
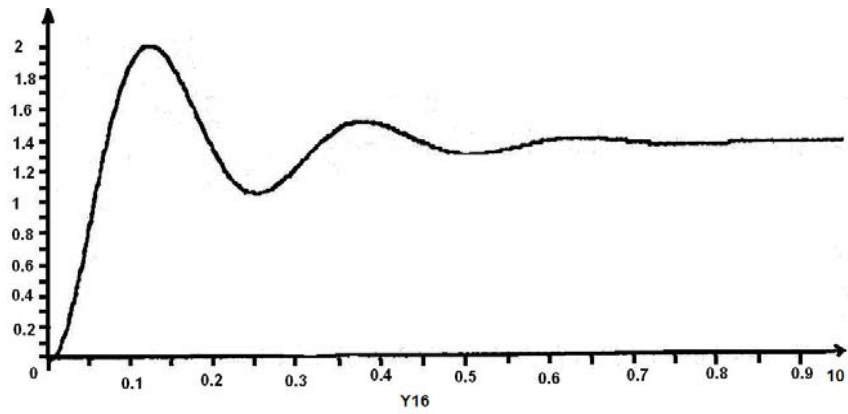
F13



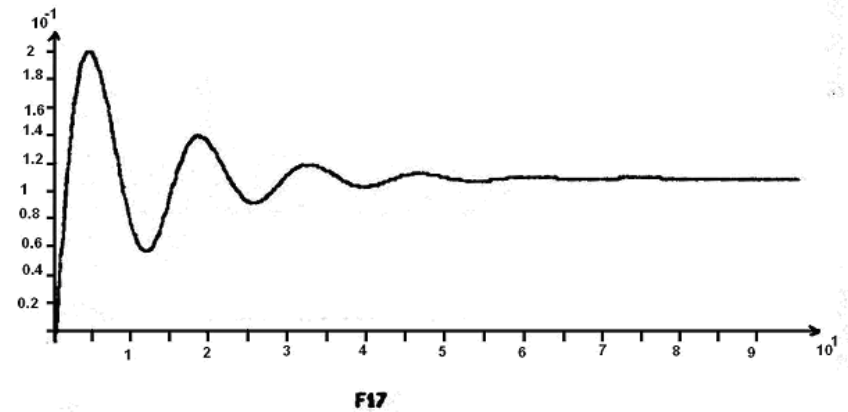
Y15



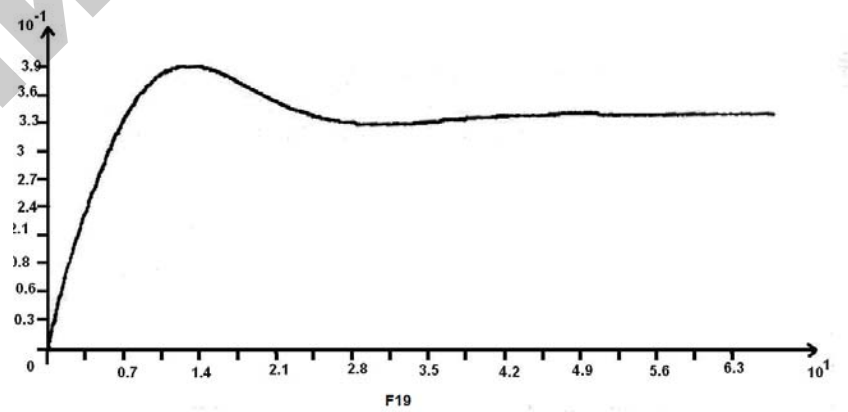
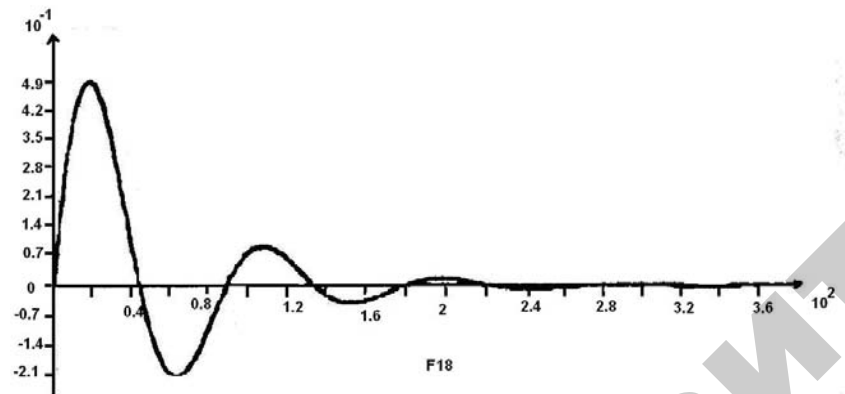
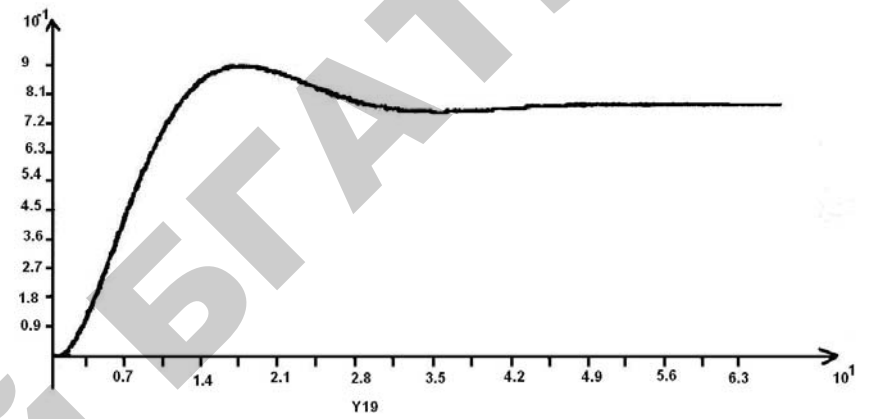
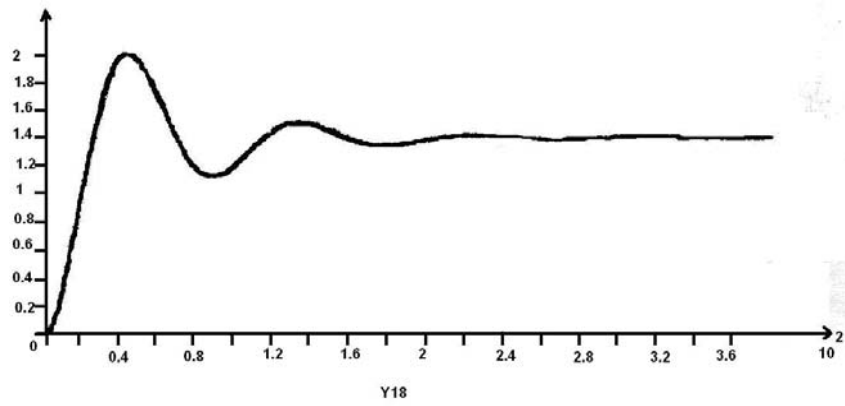
F15

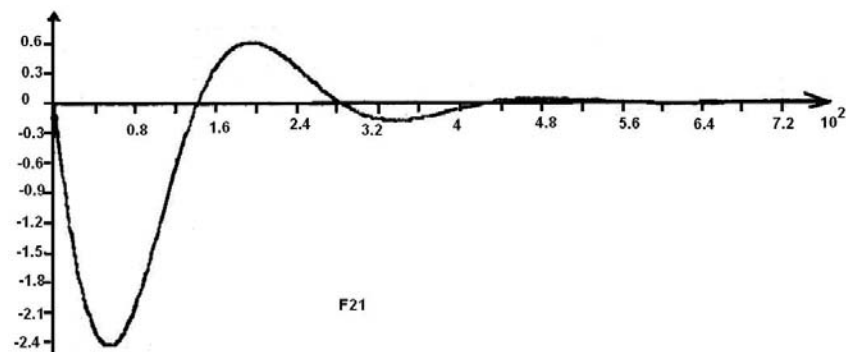
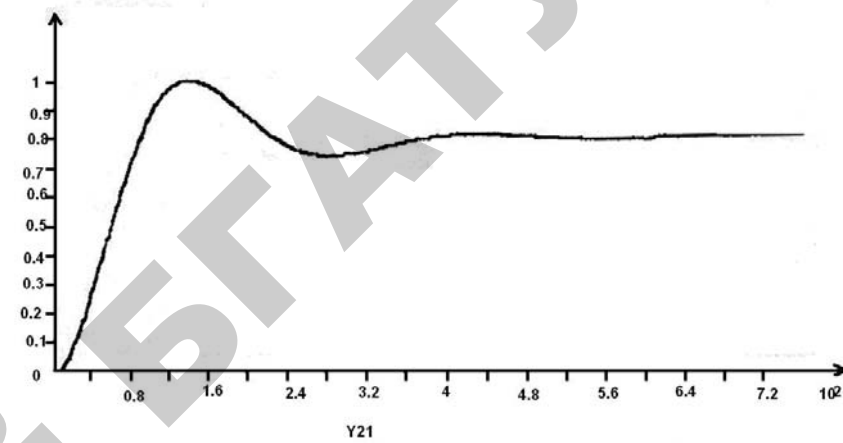
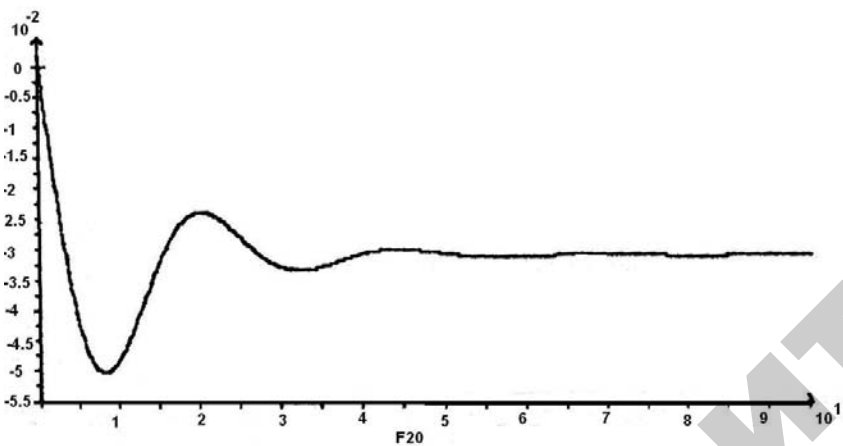
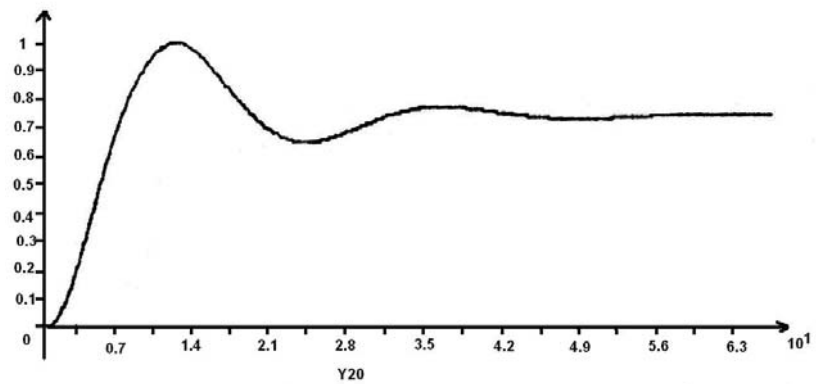


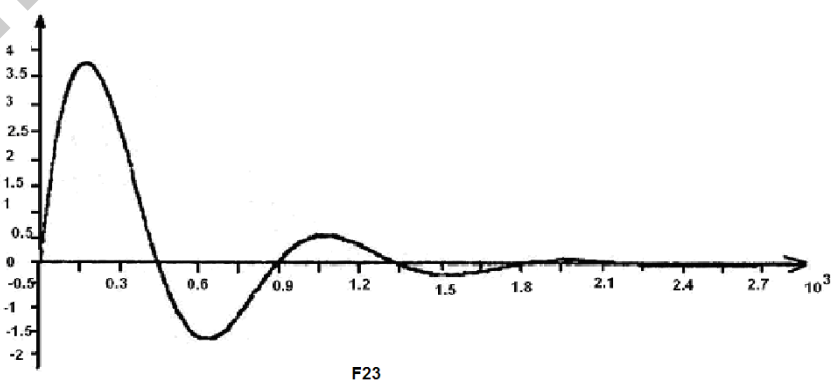
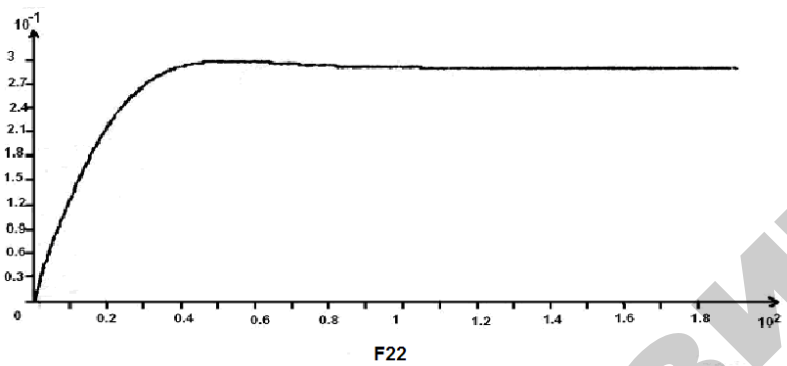
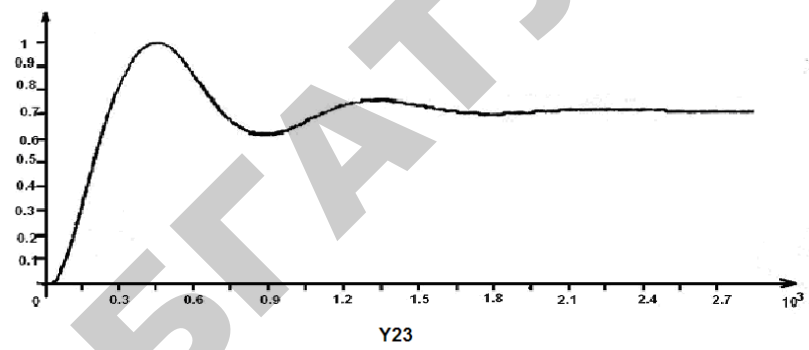
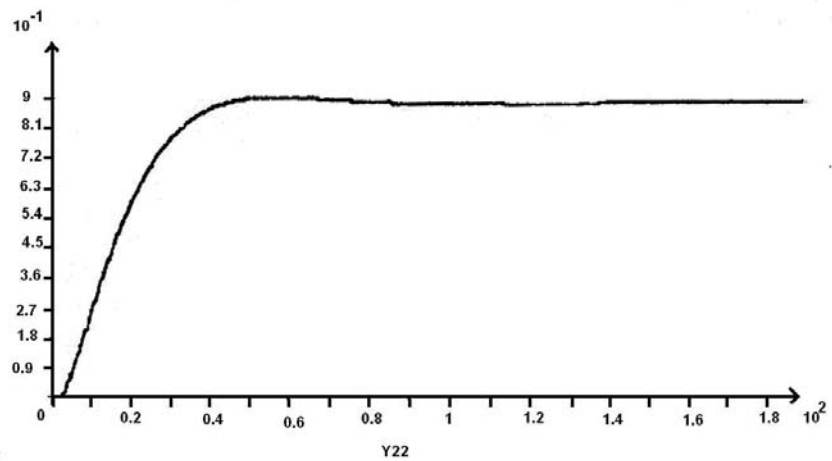
F16

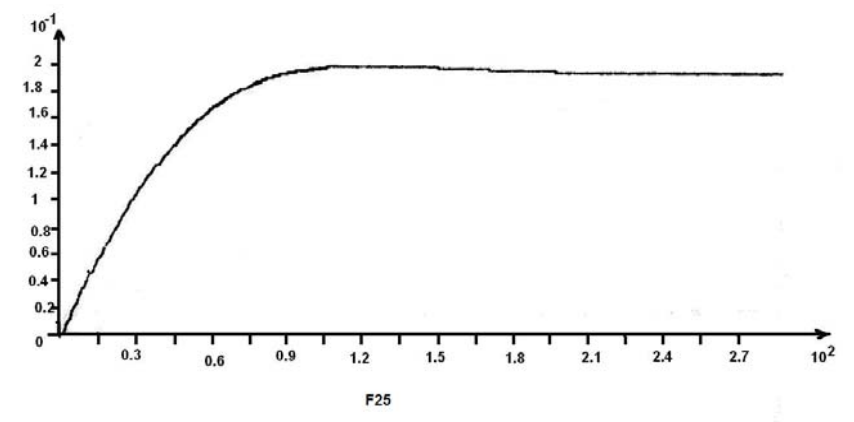
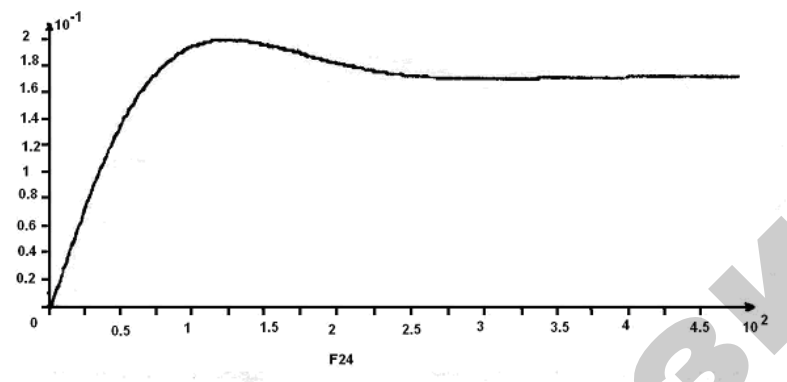
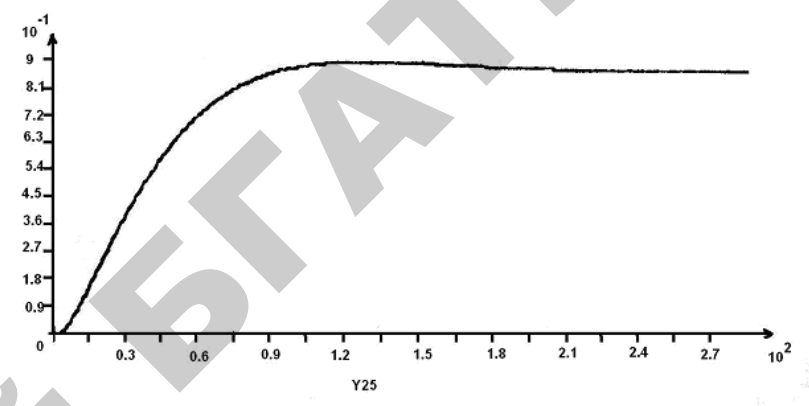
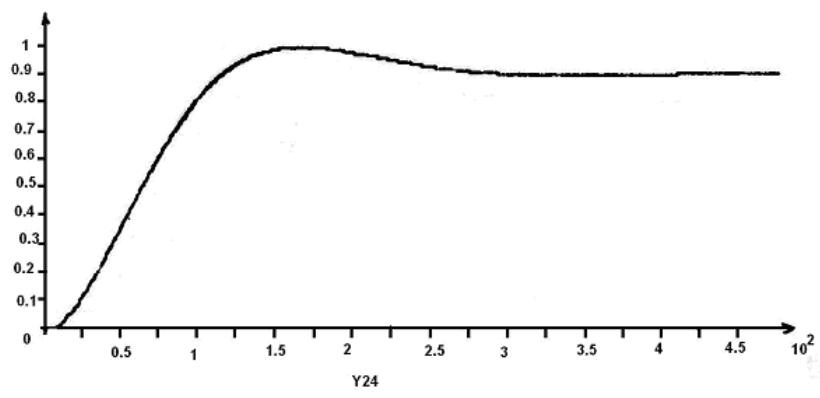


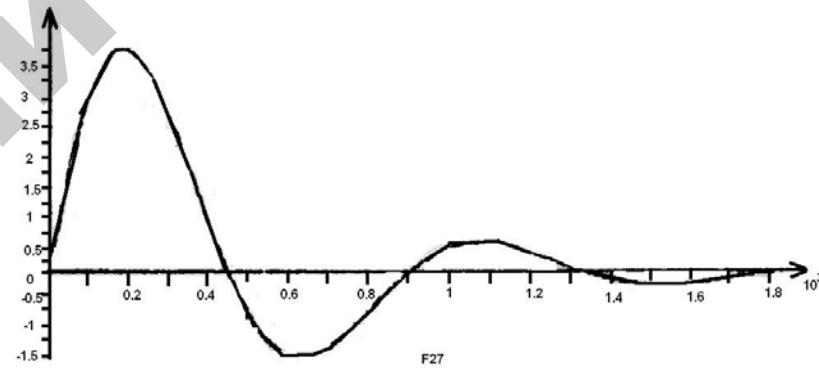
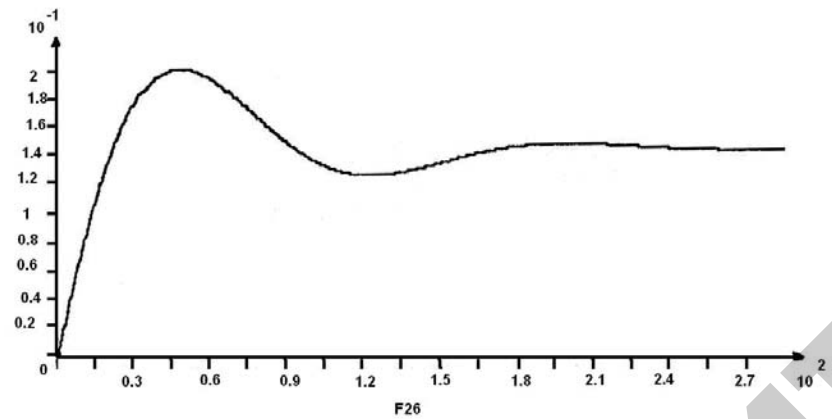
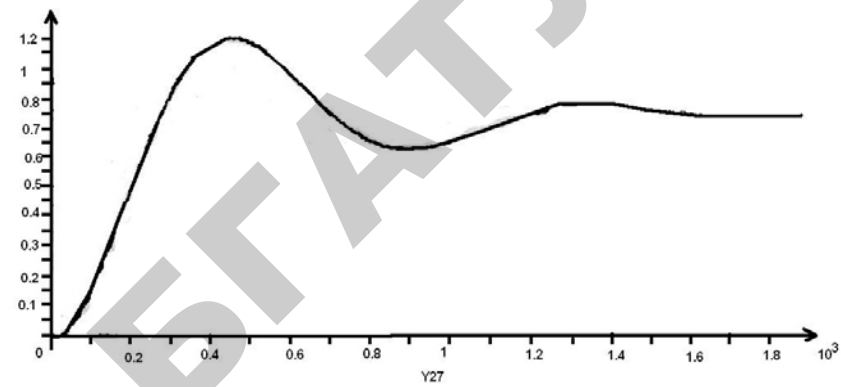
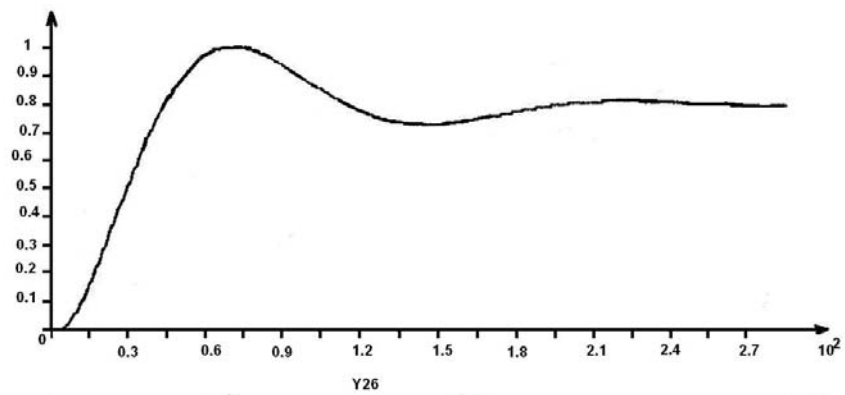
F17

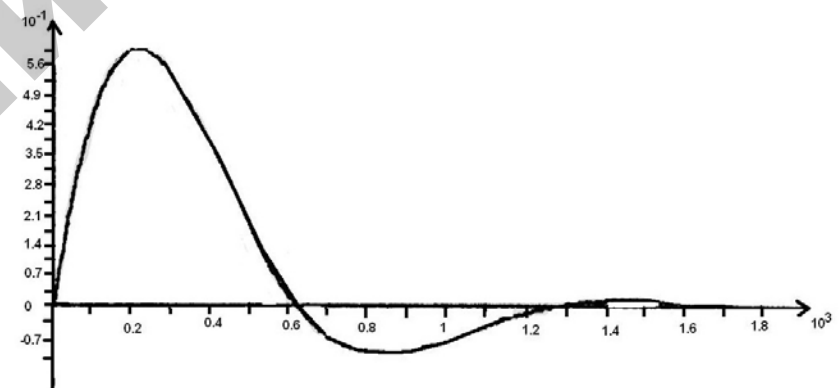
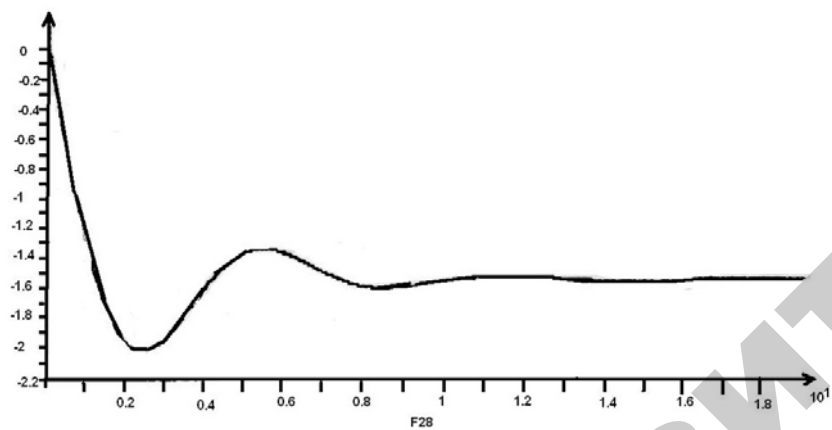
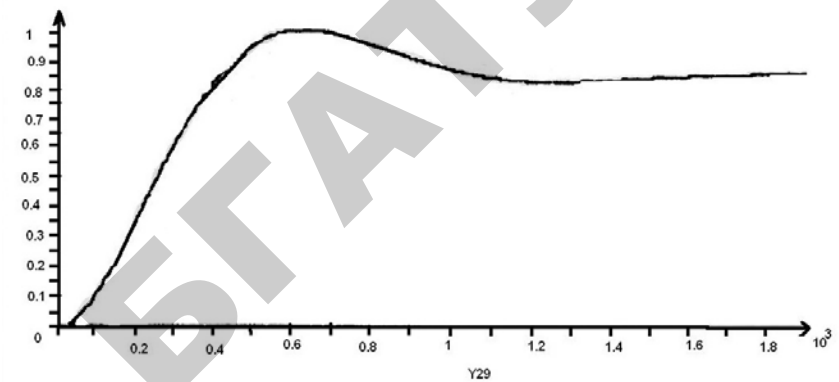
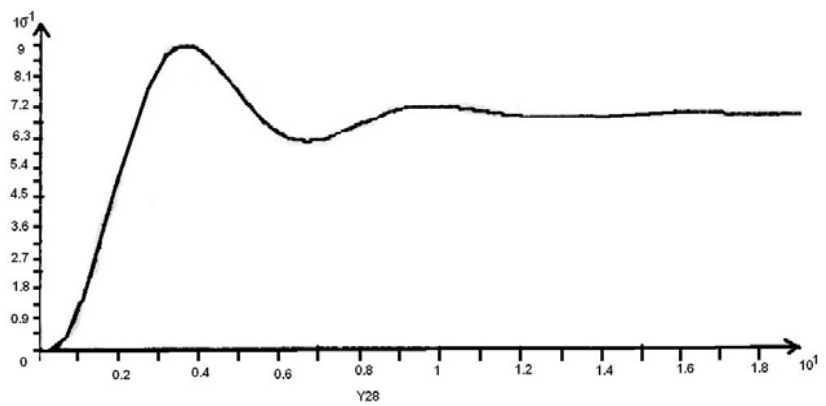


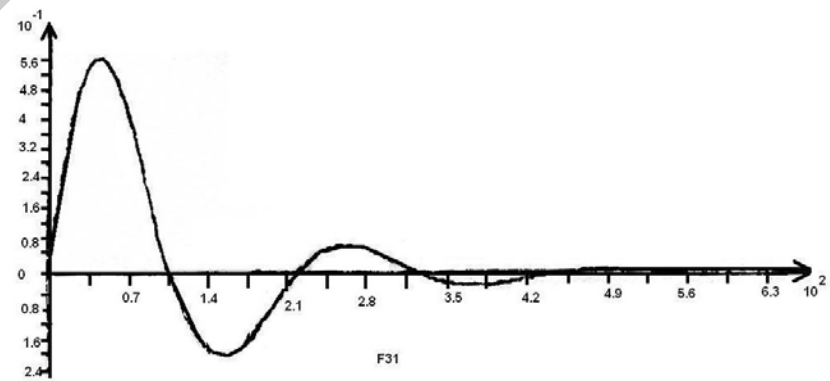
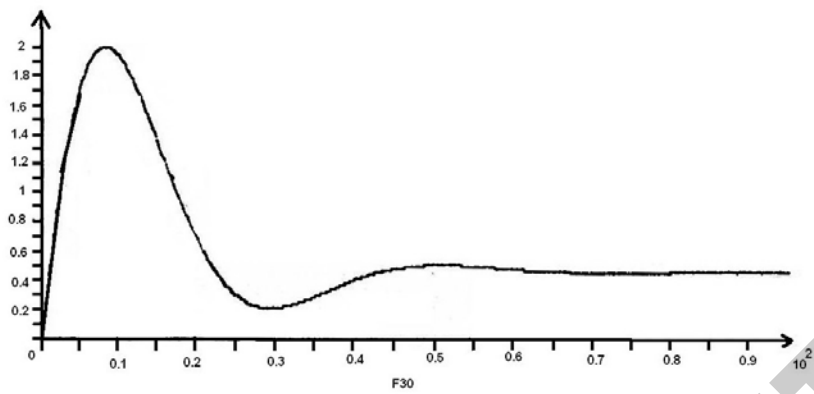
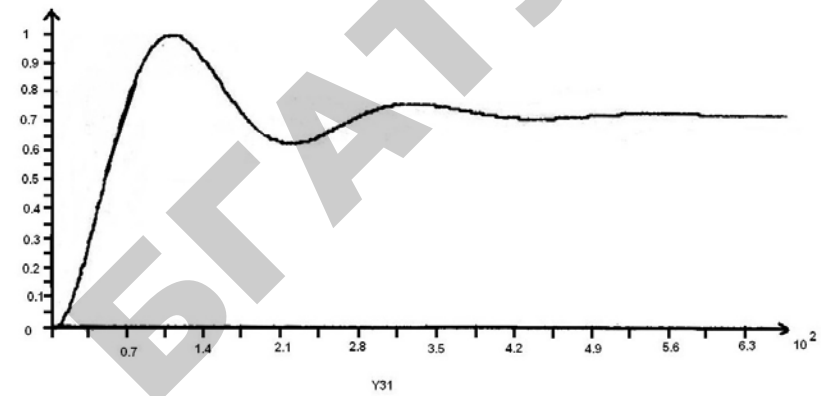
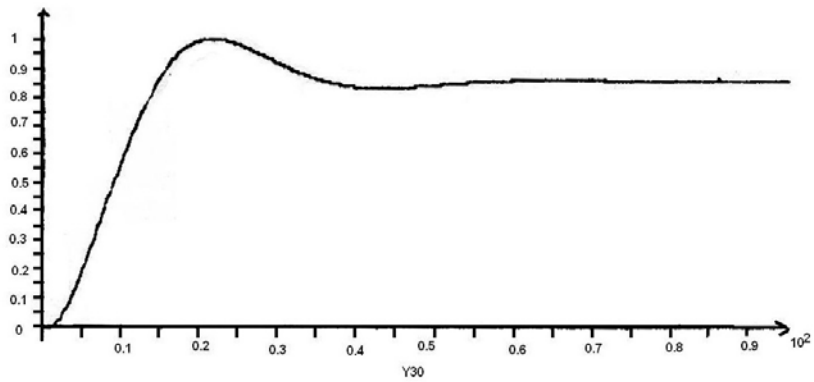


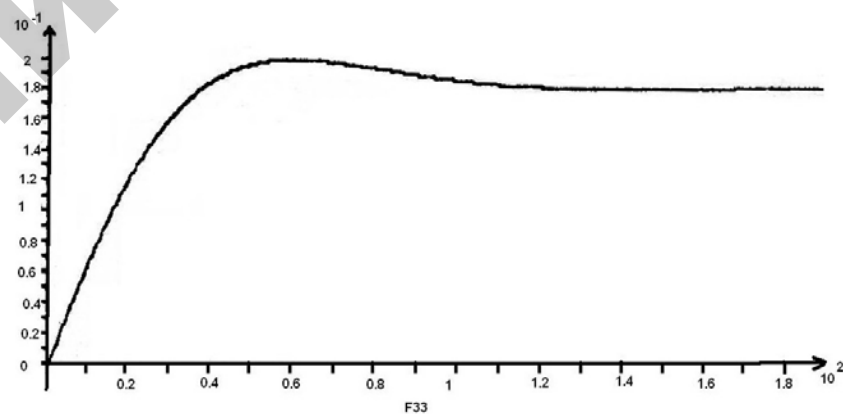
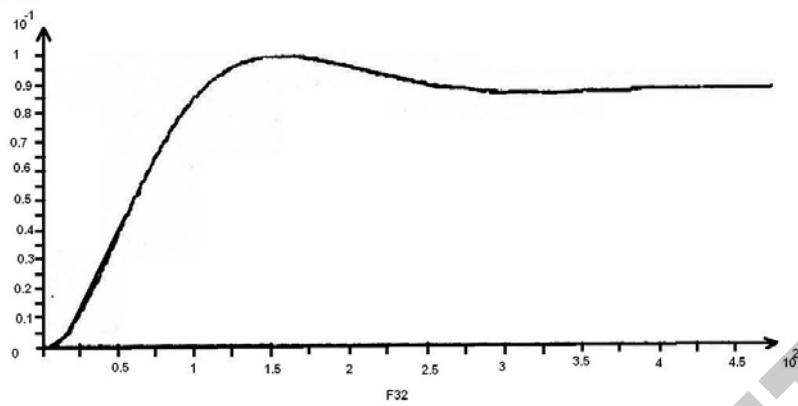
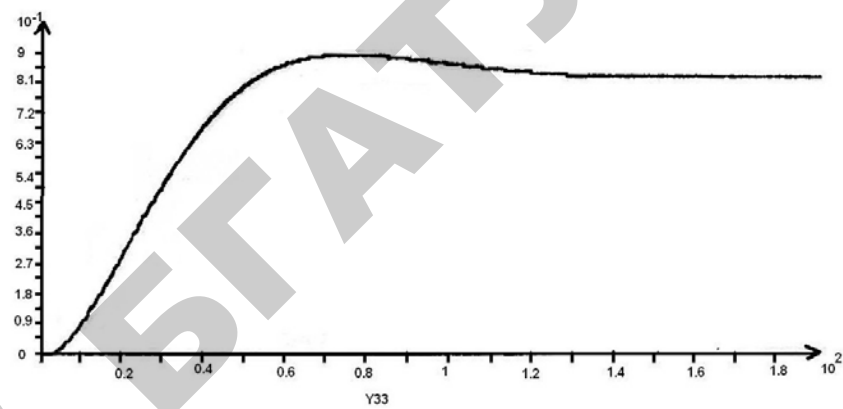
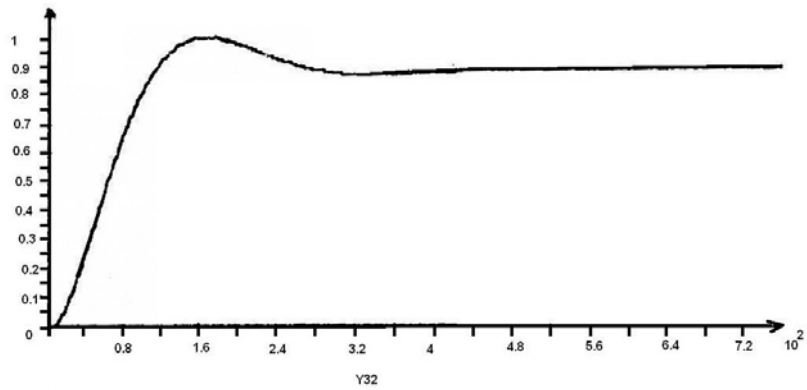


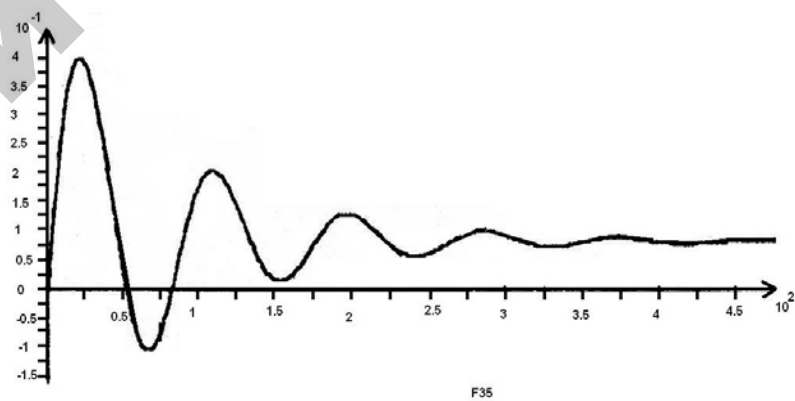
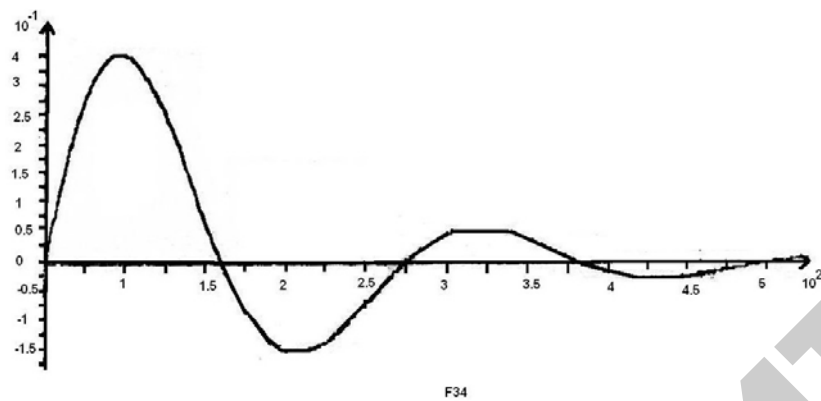
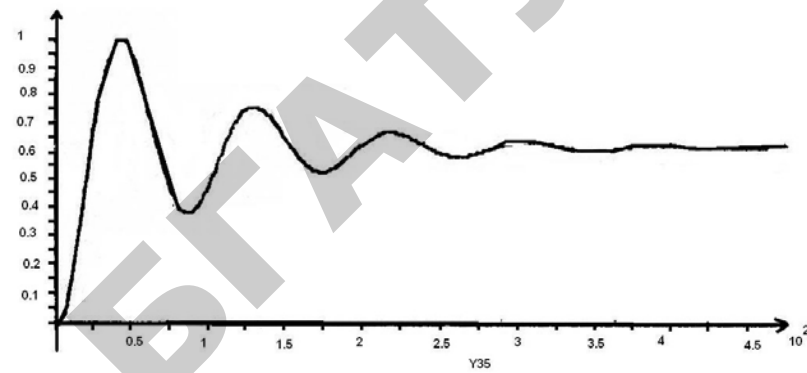
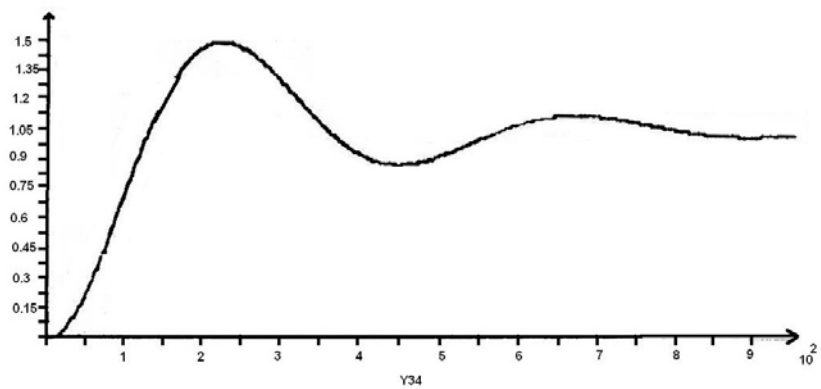


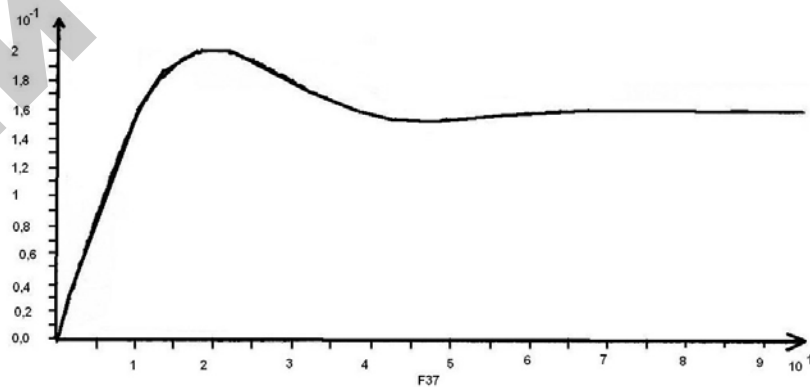
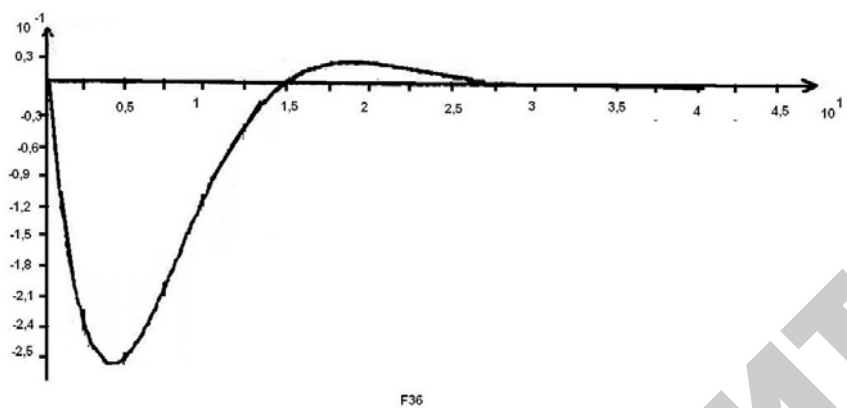
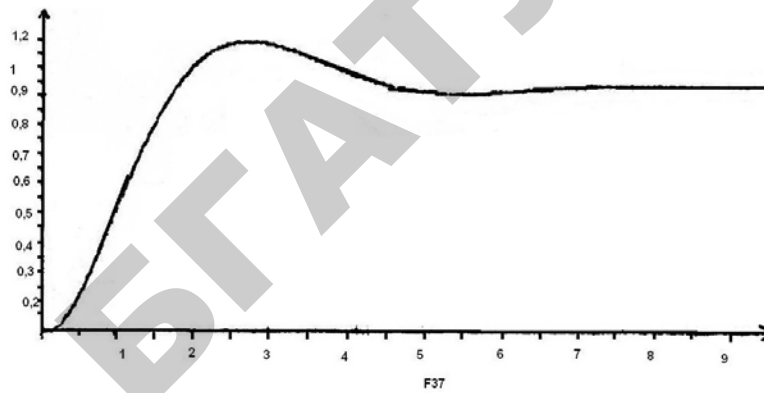
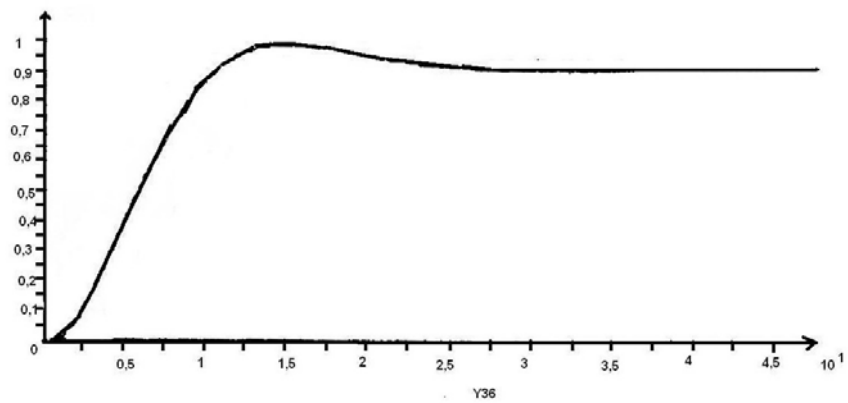


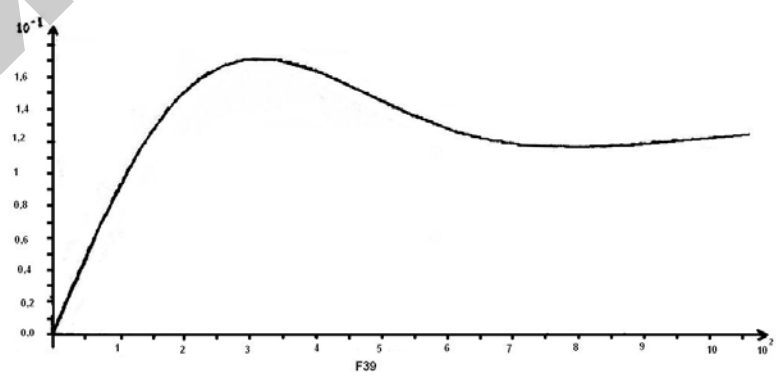
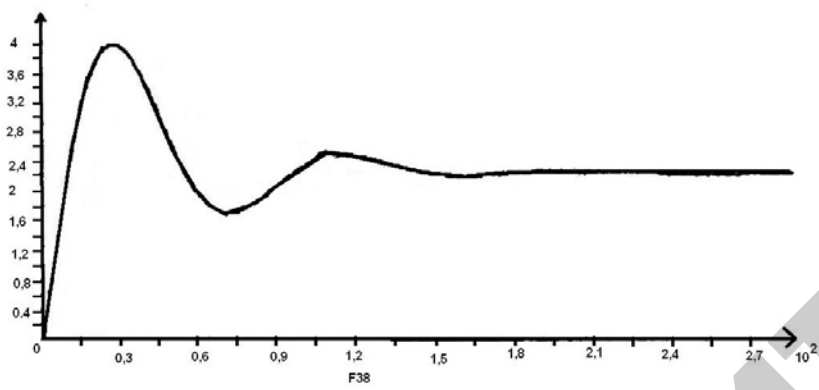
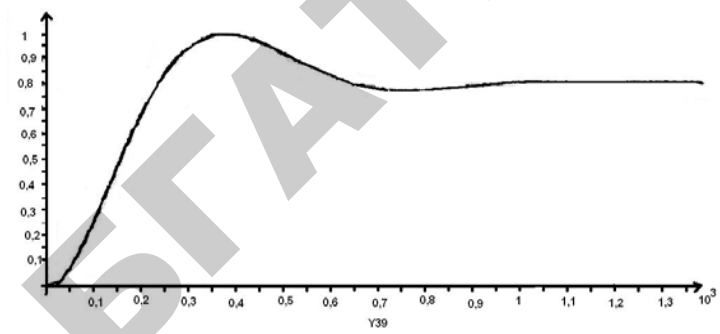
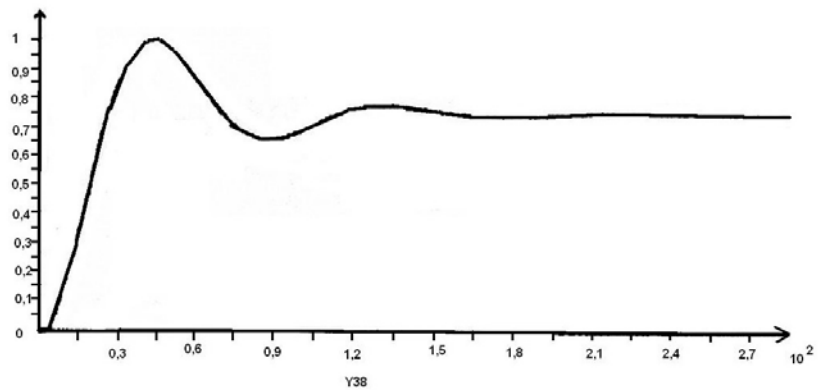












ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Сидоренко Юрий Анатольевич, Мякинник Елена Евгеньевна

ТЕОРИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО
УПРАВЛЕНИЯ

Практикум

Ответственный за выпуск *О. Ч. Ролич*
Редактор *Н. А. Антипович*
Компьютерная верстка *А. И. Стебуля*

Подписано в печать 10.01.2012 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 7,67. Уч.-изд. л. 6,0. Тираж 100 экз. Заказ 13.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
ЛИ № 02330/0552984 от 14.04.2010.
ЛП № 02330/0552743 от 02.02.2010.
Пр. Независимости, 99–2, 220023, Минск.