

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

В. И. Устич

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Учебно-методическое пособие по курсовой работе для студентов,
обучающихся в бакалавриате по направлению подготовки
«Автоматизация технологических процессов и производств»

Калининград
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»
2019

УДК 519.876.5, 004.942

РЕЦЕНЗЕНТ

кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет» Н.С. Будченко

Устич, В.И.

Моделирование систем и процессов: учебно–методическое пособие по курсовой работе / В.И. Устич. – Калининград: Изд-во ФГБОУ ВО «КГТУ», 2018. – 35 с.

В настоящем пособии приведены задание по курсовой работе по дисциплине «Моделирование систем и процессов», требования и методические указания по ее выполнению, примеры моделирования объектов управления, содержание пояснительной записки, в которой должны быть представлены результаты работы.

Ил. 6, табл. 30, список лит. – 7 наименований

Учебно–методическое пособие рассмотрено и одобрено кафедрой автоматизации производственных процессов ФГБОУ ВО "Калининградский государственный технический университет 26 марта 2019 г., протокол № 07

Учебно–методическое пособие рекомендовано к печати методической комиссией факультета автоматизации производства и управления ФГБОУ ВО "Калининградский государственный технический университет» 17 апреля 2019 г., протокол № 03

УДК 519.876.5, 004.942

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Калининградский государственный технический университет", 2019 г.
© Устич В.И., 2019 г.

Введение

Целью освоения модуля «Моделирование систем и процессов» является формирование у студентов знаний и умений построения моделей различных типов и исследования систем и технологических процессов методами математического и имитационного моделирования, в том числе как объектов управления на персональном компьютере посредством современных прикладных программных средств.

Учебная программа модуля, помимо лекционных, практических занятий и лабораторного практикума, предусматривает выполнение студентами курсовой работы – индивидуального задания по моделированию объекта, синтезу и анализу системы автоматического регулирования технологическим процессом (объектом).

Основная цель курсовой работы – закрепление, расширение и углубление знаний, полученных в теоретическом курсе, приобретение навыков моделирования в условиях большей, чем в лабораторном практикуме, самостоятельности. Курсовая работа предполагает комплексное использование студентом знаний по технологическим процессам, теории автоматического управления, приемам и средствам моделирования.

1. Задание по курсовой работе

Курсовая работа предполагает:

- разработку топологической (обобщенной информационной, параметрической) модели процесса (объекта) по заданию преподавателя;
- синтез математической модели процесса (объекта);
- определение передаточной функции процесса (объекта) по его динамической (переходной) характеристике;
- синтез системы автоматического регулирования (САР) по заданному каналу с определением структуры и параметров настройки регулятора;
- моделирование САР с использованием пакета прикладных программ Vissim;
- анализ результатов моделирования САР.

Конкретный процесс (объект) (вариант задания) определяется преподавателем с учетом пожеланий студента. Рекомендуется проводить курсовое проектирование в рамках темы (процесса, объекта, контура регулирования) выпускной квалификационной работы (ВКР) студента (при ее наличии) с целью дальнейшего включения результатов работы в состав пояснительной записки и графической части ВКР.

Результаты курсовой работы представляются в виде пояснительной записки, содержание которой приведено в п. 2.10.

2. Методические указания по выполнению курсовой работы

2.1. Для успешного выполнения курсовой работы необходимы знания, умения и навыки по моделированию технологических процессов (объектов) и синтезу соответствующей САР в объеме, достаточном для:

- разработки различных моделей процесса (объекта) (топологических, математических, экспериментальных);
- синтезу на их основе САР и их моделирования;
- анализу полученных результатов моделирования.

В ходе и в результате выполнения курсовой работы указанные знания, умения и навыки систематизируются, расширяются и углубляются.

2.2. Порядок выполнения курсовой работы. Преподаватель по согласованию со студентом определяет тему курсовой работы (технологический процесс (объект)). Студент по номеру зачетной книжки выбирает необходимые для выполнения курсовой работы данные (приложение). После получения и уточнения (при необходимости) задания по моделированию следует:

- описать заданный технологический процесс или объект;
- построить его топологическую (обобщенную информационную, параметрическую) модель;
- разработать математическую модель процесса (объекта) управления;
- определить передаточную функцию процесса (объекта) по его переходной характеристике (кривой разгона), т.е. построить экспериментальную модель по заданным исходным данным;
- выбрать тип и параметры настройки регулятора по передаточной функции процесса (объекта).
- произвести моделирование САР в пакете Vissim;
- проанализировать результаты моделирования.

Результаты каждого этапа курсовой работы необходимо описать в пояснительной записке к ней.

2.3. Описание заданного технологического процесса или объекта должно включать сведения о выбранном процессе или объекте, включая варианты (способы, технологии) его проведения или функционирования, обобщенное представление в виде схемы, основные параметры, характеризующие процесс, и их значения в номинальном режиме работы.

2.4. Построению топологической (параметрической) модели предшествует тщательное изучение заданного процесса или объекта с точки зрения автоматизации. При этом рекомендуется дополнительно ознакомиться с постановкой задачи моделирования и методами построения математического описания различных процессов, изложенных в рекомендуемой литературе по модулю.

Одним из видов предварительного математического описания, позволяющего представить качественно структуру математической модели объекта автоматизации, является топологическая (обобщенная информационная, параметрическая) модель объекта. Обобщенная информационная модель отражает состав и взаимосвязи

основных параметров и воздействий, определяющих текущее состояние объекта управления.

В общем случае эти параметры могут быть разделены на четыре группы (рис.1):

1) входные контролируемые параметры (X_1, \dots, X_n), характеризующие качество и количество исходных продуктов (первичное сырье и полуфабрикаты);

2) входные неконтролируемые параметры (f_1, \dots, f_m) - возмущающие воздействия, характеризующие изменения окружающей среды, влияние случайных примесей в исходном сырье, изменение его физико-химических свойств, флуктуации характеристик материалов, влияние износа и старения оборудования, наводки и шумы по каналу управления и т.д.;

3) управляемые выходные параметры (Y_1, \dots, Y_k), характеризующие обобщенные технические и технико-экономические показатели, которыми оценивают качество и экономическую эффективность работы объекта. Эти показатели являются определяющими при выборе технологического режима управления;

4) управляющие воздействия (U_1, \dots, U_z), при помощи которых поддерживается заданный технологический режим процесса (изменение установок регуляторов, регулирующих органов, воздействия на исполнительный механизм и т.д.).

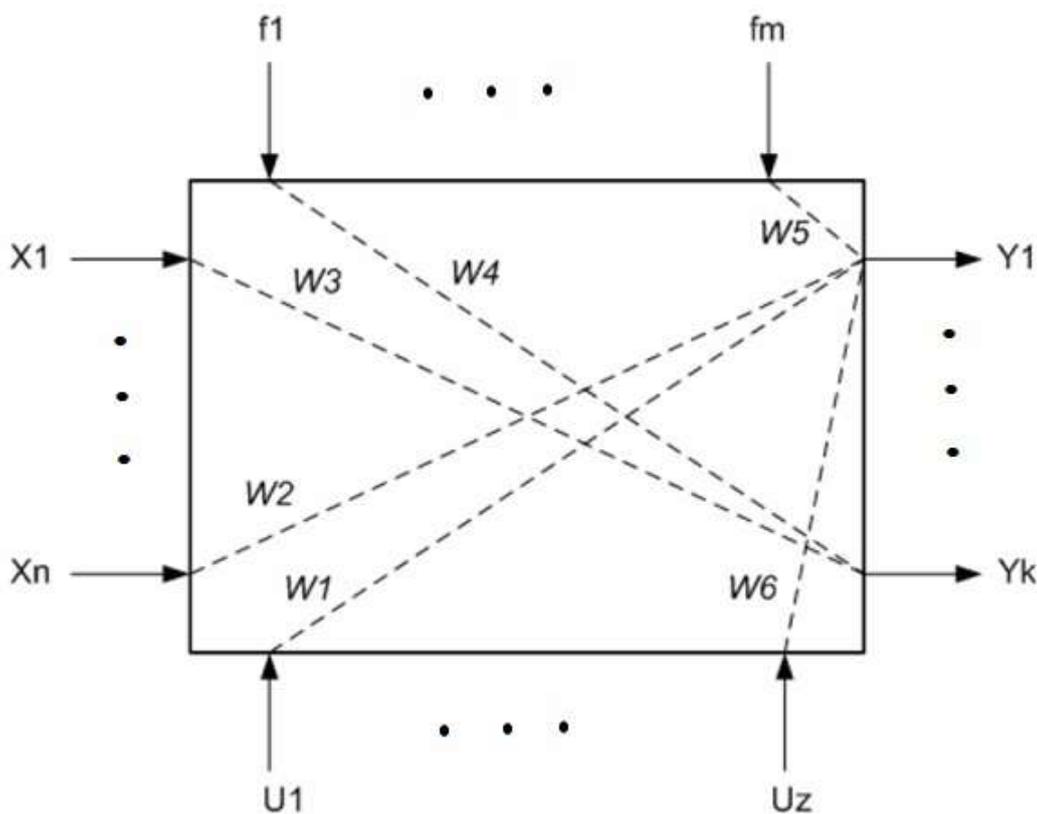


Рис. 1. Обобщенная информационная модель объекта управления

При выполнении задания по составлению обобщенной информационной модели необходимо рассматривать наиболее существенные входные и выходные параметры объекта управления и их связи.

2.5. Разработка математической модели процесса (объекта) управления производится на основе использования уравнений балансов, рассмотренных в лекционных материалах, на практических занятиях, а также в рекомендуемой литературе. Цель данного раздела – получение качественного описания модели (ее структуры).

При построении любых математических моделей важное значение имеет корректное введение всевозможных допущений, приводящих к упрощению моделей (в частности, некоторая идеализация условий протекания процессов). При этом требуется обеспечить адекватность разрабатываемой модели оригиналу (процессу или объекту). В зависимости от принятых допущений сложность описания модели может изменяться.

Результатом моделирования должны быть передаточные функции объекта по каналам управления и основных возмущений, полученные в общем виде (без численных значений), т.е. качественная модель объекта управления.

2.6. Определение передаточной функции процесса (объекта) по его динамической (переходной) характеристике (кривой разгона).

Определение количественных параметров модели (значений коэффициентов передачи, времени запаздывания и постоянных времени передаточных функций объекта управления по различным каналам), как правило, производится экспериментальным путем по результатам пассивного или активного экспериментов или по имеющимся уже обработанным экспериментальным данным (например, кривой разгона по определенному каналу объекта).

По номеру своей зачетной книжки студент определяет вариант задания (приложение) и строит переходную характеристику (кривую разгона) по заданным данным и значению входного воздействия.

Значения параметров передаточной функции объекта удобнее определять графо – аналитическим путем, согласно, например, источникам [4, 6].

2.7. Выбор типа и параметров настройки регулятора по передаточной функции процесса (объекта) предполагает анализ модели объекта для определения возможности использования различных типов линейных регуляторов (П-, ПИ-, ПИД - регуляторы) для управления объектом, изложенных, например, в [5].

В соответствии с выбранным типом регулятора, виду желаемого переходного процесса и принятой методикой расчета определяются численные значения параметров настройки регулятора. При этом следует отметить, что в различных источниках приводятся достаточно большое число методик расчета, дающих при моделировании САР разные результаты (например, [5, 6]). Рекомендуется ориентироваться на методики, приведенные для расчета параметров при изменении задающего воздействия (уставки регулятора), а также на требования к переходному процессу в заданном объекте.

2.8. Моделирование САР, содержащей выбранный регулятор и рассчитанную модель объекта, производится в пакете прикладных программ Vissim или подобном.

Моделирование производится по каналу управления (изменение уставки задающего воздействия).

При выполнении данного раздела курсовой работы рекомендуется обращать особое внимание на выбор правильного масштаба временной оси графика переходного процесса (конечного времени моделирования). Установившееся значение регулируемого параметра (с учетом заданной точности его поддержания) должно находиться в последней четверти временной оси графика.

2.9. Анализ результатов моделирования включает определение показателей качества процесса регулирования (время регулирования, статическую ошибку (при наличии), перерегулирование) и их сравнение с заданными (требуемыми) значениями.

В случае невыполнения требований к качеству процесса регулирования следует произвести подстройку параметров или выбрать другой тип регулятора, повторить моделирование САР и вновь рассчитать показатели качества.

2.10. Пояснительная записка по курсовой работе должна состоять из титульного листа, содержания, основной части, приложений (при необходимости).

Основная часть включает введение, разделы записки, заключение, список литературы.

Во введении приводится информация о целях и задачах моделирования применительно к заданному технологическому процессу (объекту).

Разделы записки:

1. Описание технологического процесса или объекта.
2. Построение топологической схемы процесса (объекта).
3. Разработка математической модели объекта управления.
4. Определение передаточной функции процесса (объекта) по его динамической характеристике (кривой разгона).
5. Выбор типа и параметров настройки регулятора.
6. Моделирование САР в пакете Vissim.
7. Анализ результатов моделирования.

В заключении приводятся основные достигнутые в ходе выполнения курсовой работы результаты.

В список литературы включаются используемые при выполнении курсовой работы источники.

Содержание, введение, заключение, список литературы как разделы не нумеруются.

3. Пример выполнения курсовой работы

Задание: объект управления – водонагреватель.

Примечание: описание технологического процесса (объекта), процесс разработки модели, построения САР и моделирования системы в примере приведены не в полном объеме. В курсовой работе следует описывать данный процесс более подробно.

3.1. Описание технологического процесса (объекта)

Процесс нагрева воды в водонагревателе схематично представлен на рис. 2.

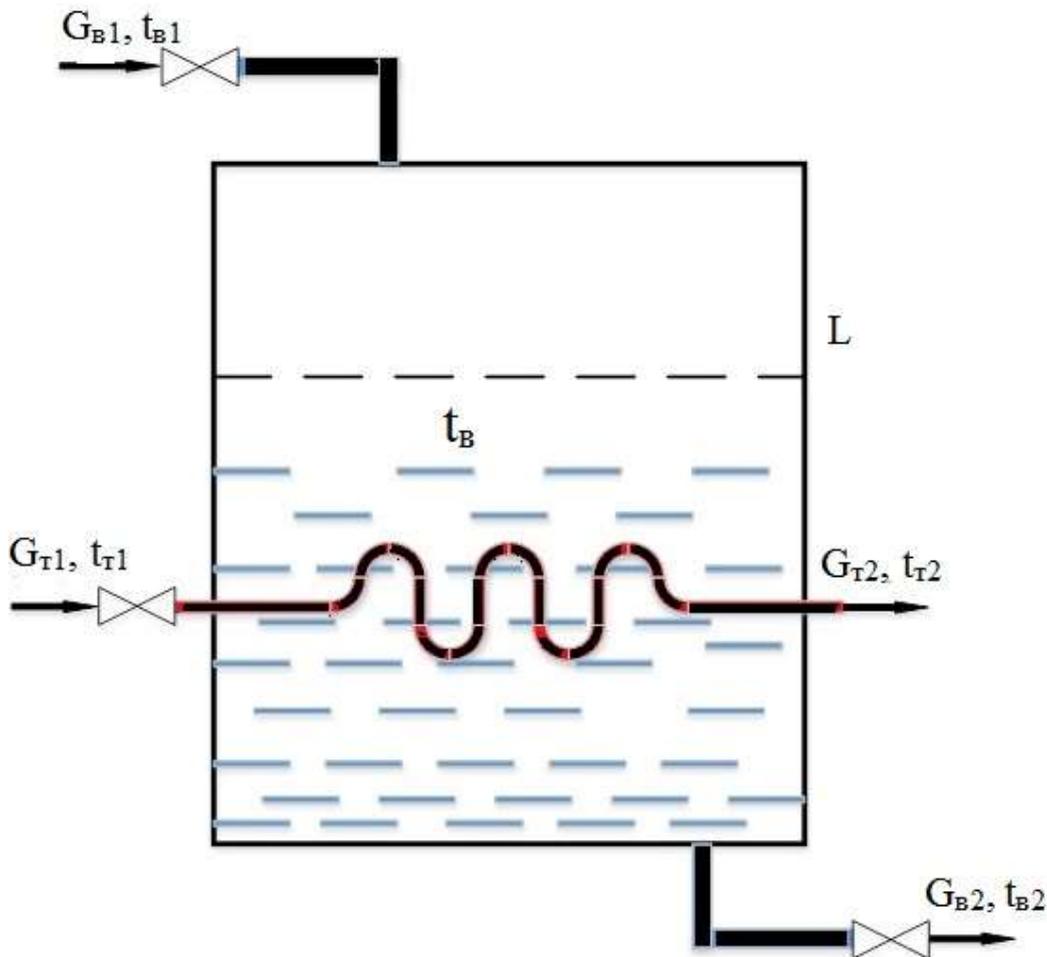


Рис. 2. Схема водонагревателя

Нагреваемая вода подается в нагреватель с начальным расходом G_{B1} и температурой t_{B1} , выходит из нагревателя с расходом G_{B2} и температурой t_{B2} . Теплоноситель (горячая вода) имеет следующие параметры:

- на входе – расход G_{T1} , температура t_{T1} ;
 - на выходе – расход G_{T2} , температура t_{T2} .
- Уровень воды – L.

3.2. Построение топологической (обобщенной информационной, параметрической) модели.

Для принятого объекта управления одним из вариантов выполнения топологической (обобщенной информационной, параметрической) модели является следующий (рис. 3):

- 1) Входные контролируемые параметры:
 - начальная температура воды $t_{в1}$, [°C];
 - начальная температура теплоносителя $t_{т1}$, [°C].
- 2) Входные неконтролируемые параметры:
 - температура окружающей среды t_{oc} , [°C].
- 3) Управляющие воздействия:
 - расход воды на входе $G_{в1}$, [кг/с];
 - расход теплоносителя на входе $G_{т1}$, [кг/с].
- 4) Управляемые выходные параметры:
 - температура воды в объекте $t_{в}$, [°C];
 - конечная температура теплоносителя $t_{т2}$, [°C];
 - расход воды на выходе $G_{в2}$, [кг/с];
 - расход теплоносителя на выходе $G_{т2}$, [кг/с];
 - уровень воды L , [м].

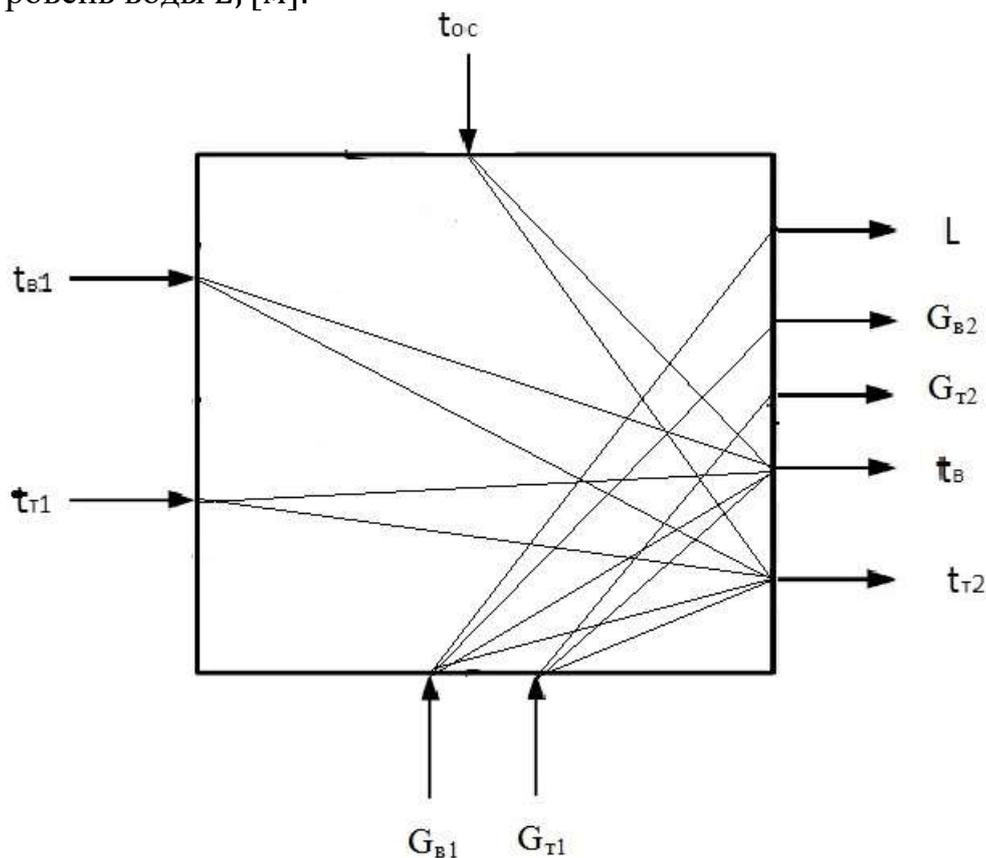


Рис. 3. Обобщенная информационная модель водонагревателя

Следует иметь в виду, что данная модель не является единственно возможной и ее представление зависит от принятых вариантов рассмотрения объекта управления.

3.3. Разработка математической модели процесса

Водонагреватель будет рассматриваться как тепловой объект (построение математической модели объекта на основе уравнений теплового баланса).

Допущения, принятые при разработке модели:

- 1) объект с сосредоточенными параметрами;
- 2) теплофизические характеристики воды и теплоносителя постоянны в рассматриваемом диапазоне температур и равны среднему значению в нем;
- 3) испарением воды пренебрегаем;
- 4) не учитывается толщина стенок теплообменника (толщина стремится к нулю).

Уравнение теплового баланса водонагревателя в статическом (установившемся) режиме работы имеет вид:

$$Q_{\text{прих}} = Q_{\text{уход}},$$

где $Q_{\text{прих}}, Q_{\text{уход}}$ – скорость изменения количества теплоты (поток тепла) на входе и выходе объекта соответственно, Дж/с.

$$\begin{aligned} Q_{\text{прих}} &= G_{\text{в1}}c_{\text{в1}}t_{\text{в1}} + G_{\text{т1}}c_{\text{т1}}t_{\text{т1}}; \\ Q_{\text{уход}} &= G_{\text{в2}}c_{\text{в2}}t_{\text{в2}} + G_{\text{т2}}c_{\text{т2}}t_{\text{т2}} + KF(t_{\text{в}} - t_{\text{ос}}), \end{aligned}$$

где

$c_{\text{в1}}, c_{\text{в2}}, c_{\text{т1}}, c_{\text{т2}}$ – удельные теплоёмкости воды и теплоносителя на входе и выходе объекте соответственно (Дж/кг · °С);

$G_{\text{т1}}, G_{\text{т2}}, G_{\text{в1}}, G_{\text{в2}}$ – массовые расходы теплоносителя и воды на входе и выходе объекта соответственно (кг/с);

$t_{\text{т1}}, t_{\text{т2}}, t_{\text{в}}, t_{\text{в1}}, t_{\text{в2}}, t_{\text{ос}}$ – температуры теплоносителя на входе и выходе объекта, воды в объекте, на входе и выходе объекта, окружающей среды соответственно (°С);

K – коэффициент теплопередачи от воды к окружающей среде через стенку объекта (Вт/м² · °С);

F – площадь стенки объекта, через которую происходит теплопередача (м²).

В динамическом (неустановившемся, переходном) режиме работы тепловой баланс нарушается и избыток (недостаток) тепла приводит к изменению температуры в водонагревателе. Данный процесс описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} m_{\text{в}}c_{\text{в}} \frac{dt_{\text{в}}}{d\tau} &= Q_{\text{прих}} - Q_{\text{уход}} = \\ &= G_{\text{в1}}c_{\text{в1}}t_{\text{в1}} + G_{\text{т1}}c_{\text{т1}}t_{\text{т1}} - G_{\text{в2}}c_{\text{в2}}t_{\text{в2}} - G_{\text{т2}}c_{\text{т2}}t_{\text{т2}} - KF(t_{\text{в}} - t_{\text{ос}}) \end{aligned}$$

где

m_B – масса воды в объекте, кг;

c_B - удельная теплоёмкость воды в объекте (Дж/кг · °С);

$\frac{d}{d\tau}$ – оператор дифференцирования.

Учитывая принятые допущения, а также принимая, что уровень воды в водонагревателе не изменяется (функционирует отдельный контур регулирования уровня), можно записать, что:

$$G_{T1} = G_{T2} = G_T; G_{B1} = G_{B2} = G_B; t_{B2} = t_B; c_{B1} = c_{B2} = c_B; c_{T1} = c_{T2} = c_T.$$

Тогда уравнение преобразуется в вид:

$$m_B c_B \frac{dt_B}{d\tau} = G_B c_B t_{B1} + G_T c_T t_{T1} - G_B c_B t_B - G_T c_T t_{T2} - KF(t_B - t_{oc}) \text{ (Вт)}.$$

Для дальнейшего вывода передаточной функции объекта необходимо произвести линеаризацию данного уравнения (рассмотреть процесс в малых отклонениях параметров от номинального режима работы). Для линеаризации следует выделить параметры, значения которых могут изменяться в процессе работы объекта. Для этого линеаризуемые параметры записываем в виде функциональной зависимости:

$$Q_{\text{прих}} = f_1(G_B; G_T; t_{B1}; t_{T1});$$
$$Q_{\text{уход}} = f_2(G_B; G_T; t_B; t_{T2}; t_{oc}).$$

Составляем уравнение в отклонениях (линеаризуем его по изменяемым параметрам), заменив $\frac{d}{d\tau}$ на p :

$$m_B c_B p \Delta t_B = \Delta G_B c_B t_{B1} + G_B c_B \Delta t_{B1} + \Delta G_T c_T t_{T1} + G_T c_T \Delta t_{T1} - \Delta G_B c_B t_B - G_B c_B \Delta t_B - \Delta G_T c_T t_{T2} - G_T c_T \Delta t_{T2} - kF(\Delta t_B - \Delta t_{oc}).$$

Преобразуя уравнение, получим:

$$(m_B c_B p + G_B c_B + kF) \Delta t_B = \Delta G_B c_B t_{B1} + G_B c_B \Delta t_{B1} + \Delta G_T c_T t_{T1} + G_T c_T \Delta t_{T1} - \Delta G_B c_B t_B - \Delta G_T c_T t_{T2} - G_T c_T \Delta t_{T2} + kF \Delta t_{oc}.$$

Передаточная функция линейных систем – это отношение изображения Лапласа выходной переменной к изображению Лапласа входной переменной. В качестве выходной переменной принята регулируемая величина – изменение температуры воды в объекте Δt_B . В качестве входных рассматриваются все остальные переменные.

Передаточная функция определяется по каналам управления и возмущения. В качестве управляющей переменной (воздействия) принято изменение расхода теплоносителя - ΔG_T .

Вывод передаточных функций:

1) По каналу управления:

$$W_y(p) = \frac{\Delta t_B}{\Delta G_T} = \frac{c_T t_{T1} - c_T t_{T2}}{m_B c_B p + G_B c_B + kF}.$$

2) По каналам возмущений.

Все изменяемые параметры, которые не были использованы в определении передаточной функции по каналу управления, относят к возмущениям. В качестве примера приведем передаточные функции по двум каналам возмущений:

- по каналу «изменение температуры воды – изменение начальной температуры теплоносителя»:

$$W_{B1} = \frac{\Delta t_B}{\Delta t_{T1}} = \frac{G_T c_T}{m_B c_B p + G_B c_B + kF};$$

- по каналу «изменение температуры воды – изменение температуры окружающей среды»:

$$W_{B2} = \frac{\Delta t_B}{t_{oc}} = \frac{kF}{m_B c_B p + G_B c_B + kF}.$$

3.4. Определение передаточной функции процесса (объекта) по его динамической (переходной) характеристике (кривой разгона)

Заданные условия: входное воздействие, при котором снята кривая разгона $X_{вх} = 75\%$; время переходного процесса $T_{пер} =$ не более 2500 с.

Построив по данным кривую разгона, графо–аналитическим методом определяем установившееся значение параметра, время запаздывания и постоянную времени объекта (рис. 4).

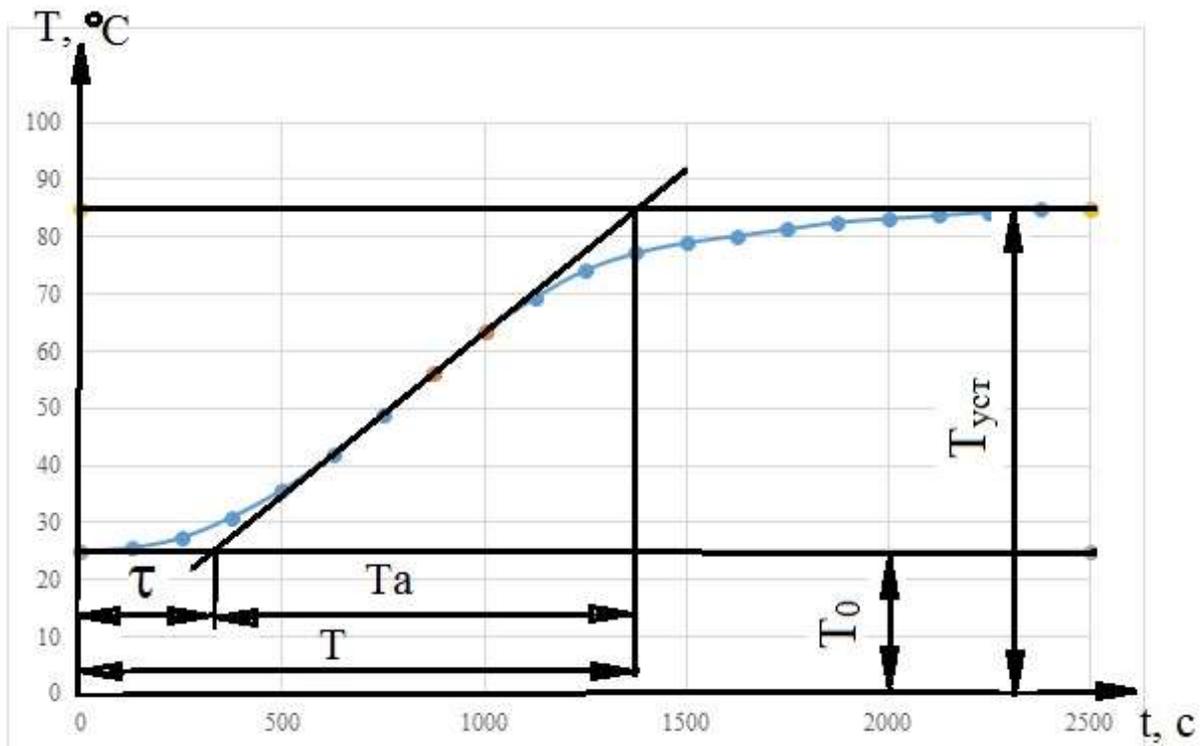


Рис. 4. Определение параметров объекта графо–аналитическим способом

Таким образом, получаем следующие параметры объекта управления: начальное значение $T_0 = 25$ (°C); установившееся значение $T_{уст} = 85$ (°C); время запаздывания $\tau = 340$ (с).

Рассчитываем постоянную времени объекта:

$$T = T_a - \tau = 1370 - 340 = 1030 \text{ (с)}.$$

Определяем коэффициент передачи объекта:

$$K = \frac{T_{уст} - T_0}{X_{вх}} = \frac{85 - 25}{75\%} = 0.8 \left(\frac{^\circ\text{C}}{\%} \right).$$

Передаточная функция объекта управления, представленная апериодическим звеном первого порядка и звеном запаздывания, выглядит следующим образом:

$$W_o(p) = \frac{K}{Tp + 1} \cdot e^{-\tau p},$$

или в численной форме

$$W_o(p) = \frac{0.8}{1030p + 1} \cdot e^{-340p}.$$

3.5. Выбор типа и параметров настройки регулятора.

Рассчитаем передаточную функцию регулятора, используя методику Циглера - Никольса. Перед выполнением данного раздела рекомендуется определить область возможного применения различных типов регуляторов, используя, например, [5], так как приведенную методику рекомендуется применять для объектов, в которых соблюдается соотношение $0,15 < \tau/T < 0,6$.

Формулы для расчета параметров регулятора (процесс с 20%-ным перерегулированием) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Тип регулятора	Параметры регулятора		
	K_{Π}	$K_{\text{и}}$	$K_{\text{д}}$
П-регулятор	$\frac{T}{k \cdot \tau}$	-	-
ПИ-регулятор	$\frac{0.9 \cdot T}{k \cdot \tau}$	$\frac{0.3 \cdot T}{k \cdot \tau^2}$	
ПИД-регулятор	$\frac{1.2 \cdot T}{k \cdot \tau}$	$\frac{0.6 \cdot T}{k \cdot \tau^2}$	$\frac{0.6 \cdot T}{k}$

В результате расчета получаем следующие передаточные функции регуляторов:

$$\text{- П-регулятор - } W_{\Pi} = K_{\Pi} = \frac{T}{k \cdot \tau} = \frac{1030}{0.8 \cdot 340} = 3.787;$$

$$\text{- ПИ-регулятор: } W_{\text{ПИ}} = K_{\Pi} + \frac{K_{\text{и}}}{p} = 3.4 + \frac{0.003}{p},$$

где

$$K_{\Pi} = \frac{0.9 \cdot T}{k \cdot \tau} = \frac{0.9 \cdot 1030}{0.8 \cdot 340} = 3.4;$$

$$K_{\text{и}} = \frac{0.3 \cdot T}{k \cdot \tau^2} = \frac{0.3 \cdot 1030}{0.8 \cdot 340^2} = 0.003;$$

$$\text{- ПИД-регулятор: } W_{\Pi} = K_{\Pi} + \frac{K_{\text{и}}}{p} + K_{\text{д}} \cdot p = 4.54 + \frac{0.007}{p} + 772.5 \cdot p;$$

где

$$K_{\Pi} = \frac{1.2 \cdot T}{k \cdot \tau} = \frac{1.2 \cdot 1030}{0.8 \cdot 340} = 4.54;$$

$$K_{\text{и}} = \frac{0.6 \cdot T}{k \cdot \tau^2} = \frac{0.6 \cdot 1030}{0.8 \cdot 340^2} = 0.007;$$

$$K_{\text{д}} = \frac{0.6 \cdot T}{k} = \frac{0.6 \cdot 1030}{0.8} = 772.5.$$

В [5] для расчета параметров регулятора при изменении задающего воздействия рекомендуется использовать зависимости, приведенные в табл. 2.

Таблица 2

Тип регулятора и форма его представления	Параметры настройки регулятора в зависимости от вида переходного процесса	
	Апериодический процесс	Процесс с 20%-ным перерегулированием
П-регулятор $W(p) = K_p$	$K_p = 0,3 \frac{T}{K\tau}$	$K_p = 0,7 \frac{T}{K\tau}$
ПИ-регулятор $W(p) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot p} \right]$	$K_p = 0,35 \frac{T}{K\tau}$ $T_i = 1,2 \cdot \tau$	$K_p = 0,6 \frac{T}{K\tau}$ $T_i = \tau$
ПИД-регулятор $W(p) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot p} + T_n p \right]$	$K_p = 0,6 \frac{T}{K\tau}$ $T_i = \tau$ $T_n = 0,5\tau$	$K_p = 0,95 \frac{T}{K\tau}$ $T_i = 1,35\tau$ $T_n = 0,47\tau$

3.6. Моделирование САП в пакете Vissim.

3.6.1. Процесс моделирования САП с использованием П-регулятора представлен на рис. 5.

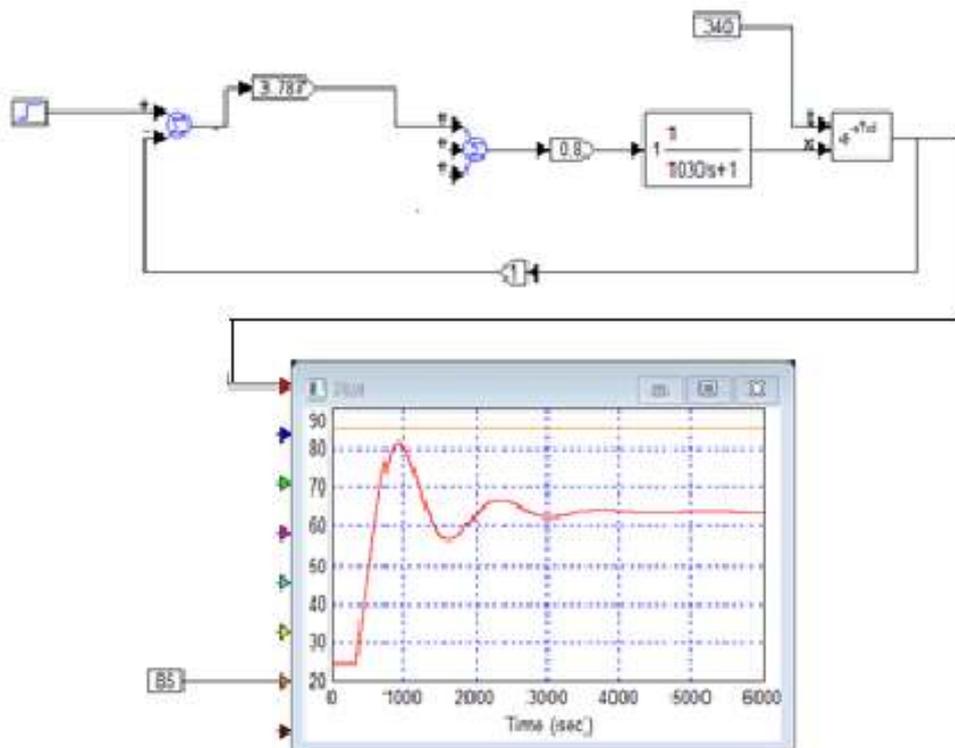


Рис. 5. Моделирование САП с использованием П – регулятора

3.6.2. Процесс моделирования САР с использованием ПИ-регулятора представлен на рис. 6.

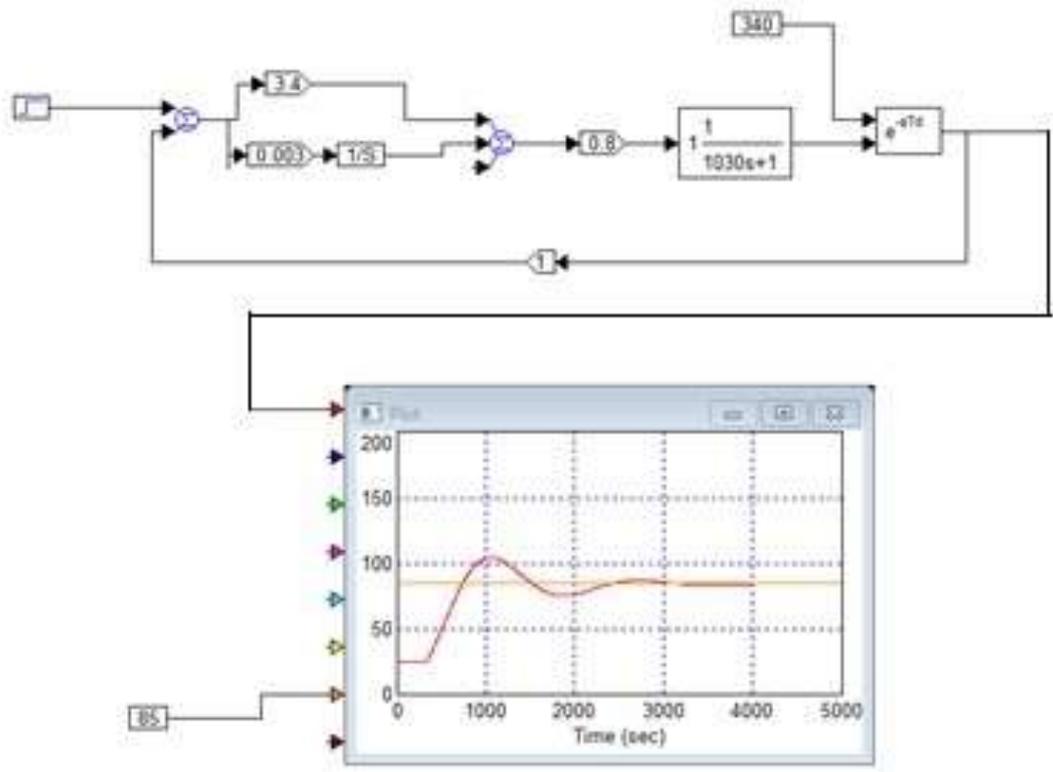


Рис. 6. Моделирование САР с использованием ПИ - регулятора

3.6.3. Процесс моделирования САР с использованием ПИД-регулятора представлен на рис. 7.

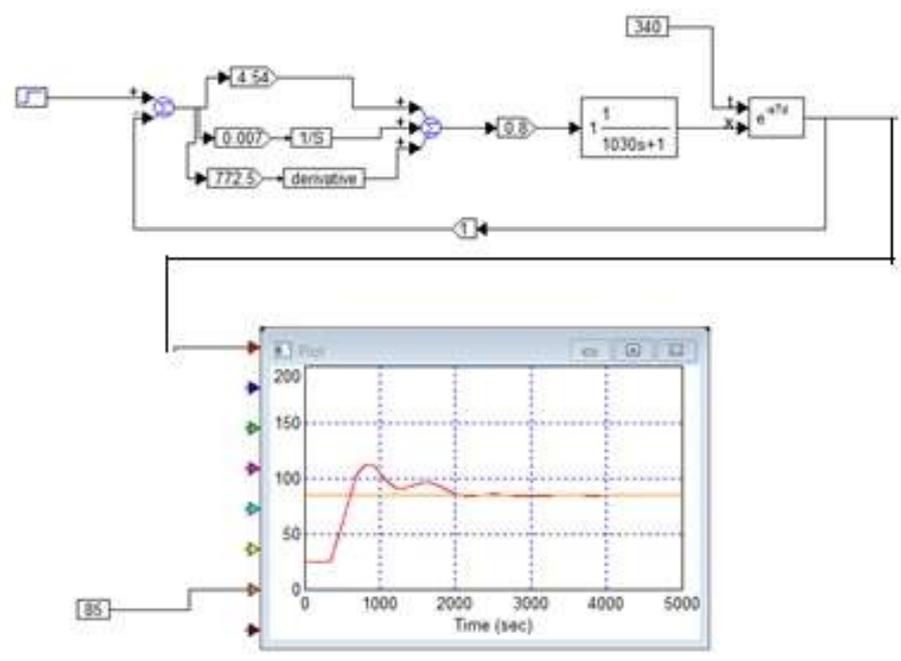


Рис. 7. Моделирование САР с использованием ПИД - регулятора

3.7. Анализ результатов моделирования

Анализ результатов моделирования следует проводить на основе соответствия полученных характеристик заданным показателям качества процесса. Для этого по полученным переходным характеристикам САР определяют следующие параметры: статическую ошибку (при наличии), время регулирования, перерегулирование (при наличии), а затем сравнивают их с заданными (по номеру варианта). При отсутствии заданных показателей в качестве их рассматриваются следующие: статическая ошибка – не более $\pm 2^\circ\text{C}$; время регулирования – не более $4 T$ (с) (при вхождении переходной характеристики в коридор $\pm 1^\circ\text{C}$); перерегулирование – не более 20%.

В случае несоответствия показателям необходимо произвести подстройку параметров выбранного регулятора и произвести повторное моделирование системы, добиваясь достижения заданных показателей качества.

Приложение

Вариант для определения данных к курсовой работе определяется по последним 2 цифрам номера зачетной книжки согласно табл. П.1.

Таблица П.1

Предпоследняя цифра номера зачетной книжки	Последняя цифра номера зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100С23	50С21	100С13	50С23	50В23	75С23	50С31	50А13	100А13	50С11
1	25С21	100В21	100А11	25С23	75В12	25А23	100А31	75А21	100А22	25А13
2	100В32	25В22	75А33	25А31	100В31	75А31	50А22	50А31	50В12	50С32
3	25А33	50С33	100А23	75В11	50В33	25В23	75С33	25А32	75А32	100С11
4	25С33	25А22	50А23	25С31	50А12	50С12	50С13	25В21	100С12	75В32
5	50В13	75С22	75В22	100С32	25В12	50В31	50В21	100В33	50В22	25С11
6	25А21	100С31	75С21	100С22	25А11	75А11	100В12	75А22	75В31	25А12
7	25С22	100В11	50В11	25С13	100А12	75С11	100С21	75В21	25В32	100А33
8	50А33	25В11	25В33	100С33	75С13	50С22	25В13	50А32	75С32	25В31
9	50А11	100А21	100В13	100А32	25С12	75С31	75А13	100В22	75В13	50В32

Расшифровка варианта: первые цифры до буквы — величина входного воздействия $X_{вх}$ (%); буква и последующие цифры — это номер варианта схемы (описаны ниже).

Пример: вариант № 75С32.

Входное воздействие $X_{вх} = 75\%$;

номер схемы С32.

Схема А11

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.2.

Таблица П.2

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	15	1100	45
100	15,6	1200	52,2
200	16,2	1300	59,4
300	16,8	1400	65,4
400	18	1500	69
500	19,8	1600	71,4
600	22,2	1700	73,2
700	25,2	1800	74,4
800	28,8	1900	74,94
900	33	2000	75
1000	37,8		

Схема А12

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.3.

Таблица П.3

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	15	1375	45
125	15,6	1500	52,2
250	16,2	1625	59,4
375	16,8	1750	65,4
500	18	1875	69
625	19,8	2000	71,4
750	22,2	2125	73,2
875	25,2	2250	74,4
1000	28,8	2375	74,94
1125	33	2500	75
1250	37,8		

Схема А13

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.4.

Таблица П.4

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	15	1650	45
150	15,6	1800	52,2
300	16,2	1950	59,4
450	16,8	2100	65,4
600	18	2250	69
750	19,8	2400	71,4
900	22,2	2550	73,2
1050	25,2	2700	74,4
1200	28,8	2850	74,94
1350	33	3000	75
1500	37,8		

Схема А21

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.5.

Таблица П.5

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	20	1100	50
100	20,6	1200	57,2
200	21,2	1300	64,4
300	21,8	1400	70,4
400	23	1500	74
500	24,8	1600	76,4
600	27,2	1700	78,2
700	30,2	1800	79,4
800	33,8	1900	79,94
900	38	2000	80
1000	42,8		

Схема А22

Заданные качественные показатели:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.6.

Таблица П.6

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	20	1375	50
125	20,6	1500	57,2
250	21,2	1625	64,4
375	21,8	1750	70,4
500	23	1875	74
625	24,8	2000	76,4
750	27,2	2125	78,2
875	30,2	2250	79,4
1000	33,8	2375	79,94
1125	38	2500	80
1250	42,8		

Схема А23

Заданные качественные показатели:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.7.

Таблица П.7

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	20	1650	50
150	20,6	1800	57,2
300	21,2	1950	64,4
450	21,8	2100	70,4
600	23	2250	74
750	24,8	2400	76,4
900	27,2	2550	78,2
1050	30,2	2700	79,4
1200	33,8	2850	79,94
1350	38	3000	80
1500	42,8		

Схема А31

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.8.

Таблица П.8

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	25	1100	55
100	25,6	1200	62,2
200	26,2	1300	69,4
300	26,8	1400	75,4
400	28	1500	79
500	29,8	1600	81,4
600	32,2	1700	83,2
700	35,2	1800	84,4
800	38,8	1900	84,94
900	43	2000	85
1000	47,8		

Схема А32

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.9.

Таблица П.9

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	25	1375	55
125	25,6	1500	62,2
250	26,2	1625	69,4
375	26,8	1750	75,4
500	28	1875	79
625	29,8	2000	81,4
750	32,2	2125	83,2
875	35,2	2250	84,4
1000	38,8	2375	84,94
1125	43	2500	85
1250	47,8		

Схема А33

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.10.

Таблица П.10

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	25	1650	55
150	25,6	1800	62,2
300	26,2	1950	69,4
450	26,8	2100	75,4
600	28	2250	79
750	29,8	2400	81,4
900	32,2	2550	83,2
1050	35,2	2700	84,4
1200	38,8	2850	84,94
1350	43	3000	85
1500	47,8		

Схема В11

Заданные качественные показатели:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.11.

Таблица П.11

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	15	1100	57
100	15,6	1200	63
200	16,2	1300	67,2
300	17,4	1400	70,2
400	20,4	1500	72
500	23,4	1600	73,2
600	27	1700	73,8
700	31,2	1800	74,4
800	37,2	1900	74,94
900	43,8	2000	75
1000	49,8		

Схема В12

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.12.

Таблица П.12

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	15	1375	57
125	15,6	1500	63
250	16,2	1625	67,2
375	17,4	1750	70,2
500	20,4	1875	72
625	23,4	2000	73,2
750	27	2125	73,8
875	31,2	2250	74,4
1000	37,2	2375	74,94
1125	43,8	2500	75
1250	49,8		

Схема В13

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.13.

Таблица П.13

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	15	1650	57
150	15,6	1800	63
300	16,2	1950	67,2
450	17,4	2100	70,2
600	20,4	2250	72
750	23,4	2400	73,2
900	27	2550	73,8
1050	31,2	2700	74,4
1200	37,2	2850	74,94
1350	43,8	3000	75
1500	49,8		

Схема В21

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.14.

Таблица П.14

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	20	1100	62
100	20,6	1200	68
200	21,2	1300	72,2
300	22,4	1400	75,2
400	25,4	1500	77
500	28,4	1600	78,2
600	32	1700	78,8
700	36,2	1800	79,4
800	42,2	1900	79,94
900	48,8	2000	80
1000	54,8		

Схема В22

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.15.

Таблица П.15

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	20	1375	62
125	20,6	1500	68
250	21,2	1625	72,2
375	22,4	1750	75,2
500	25,4	1875	77
625	28,4	2000	78,2
750	32	2125	78,8
875	36,2	2250	79,4
1000	42,2	2375	79,94
1125	48,8	2500	80
1250	54,8		

Схема В23

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.16.

Таблица П.16

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	20	1650	62
150	20,6	1800	68
300	21,2	1950	72,2
450	22,4	2100	75,2
600	25,4	2250	77
750	28,4	2400	78,2
900	32	2550	78,8
1050	36,2	2700	79,4
1200	42,2	2850	79,94
1350	48,8	3000	80
1500	54,8		

Схема В31

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.17.

Таблица П.17

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	25	1100	67
100	25,6	1200	73
200	26,2	1300	77,2
300	27,4	1400	80,2
400	30,4	1500	82
500	33,4	1600	83,2
600	37	1700	83,8
700	41,2	1800	84,4
800	47,2	1900	84,94
900	53,8	2000	85
1000	59,8		

Схема В32

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.18.

Таблица П.18

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	25	1375	67
125	25,6	1500	73
250	26,2	1625	77,2
375	27,4	1750	80,2
500	30,4	1875	82
625	33,4	2000	83,2
750	37	2125	83,8
875	41,2	2250	84,4
1000	47,2	2375	84,94
1125	53,8	2500	85
1250	59,8		

Схема В33

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.19.

Таблица П.19

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	25	1650	67
150	25,6	1800	73
300	26,2	1950	77,2
450	27,4	2100	80,2
600	30,4	2250	82
750	33,4	2400	83,2
900	37	2550	83,8
1050	41,2	2700	84,4
1200	47,2	2850	84,94
1350	53,8	3000	85
1500	59,8		

Схема С11

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.20.

Таблица П.20

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	15	1100	67,2
100	15,6	1200	69
200	17,4	1300	70,2
300	21	1400	71,4
400	25,8	1500	72,6
500	31,8	1600	73,2
600	39	1700	73,8
700	46,2	1800	74,4
800	53,4	1900	74,94
900	59,4	2000	75
1000	64,2		

Схема С12

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.21.

Таблица П.21

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	15	1375	67,2
125	15,6	1500	69
250	17,4	1625	70,2
375	21	1750	71,4
500	25,8	1875	72,6
625	31,8	2000	73,2
750	39	2125	73,8
875	46,2	2250	74,4
1000	53,4	2375	74,94
1125	59,4	2500	75
1250	64,2		

Схема С13

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.22.

Таблица П.22

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	15	1650	67,2
150	15,6	1800	69
300	17,4	1950	70,2
450	21	2100	71,4
600	25,8	2250	72,6
750	31,8	2400	73,2
900	39	2550	73,8
1050	46,2	2700	74,4
1200	53,4	2850	74,94
1350	59,4	3000	75
1500	64,2		

Схема С21

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.23.

Таблица П.23

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	20	1100	72,2
100	20,6	1200	74
200	22,4	1300	75,2
300	26	1400	76,4
400	30,8	1500	77,6
500	36,8	1600	78,2
600	44	1700	78,8
700	51,2	1800	79,4
800	58,4	1900	79,94
900	64,4	2000	80
1000	69,2		

Схема С22

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.24.

Таблица П.24

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	20	1375	72,2
125	20,6	1500	74
250	22,4	1625	75,2
375	26	1750	76,4
500	30,8	1875	77,6
625	36,8	2000	78,2
750	44	2125	78,8
875	51,2	2250	79,4
1000	58,4	2375	79,94
1125	64,4	2500	80
1250	69,2		

Схема С23

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.25.

Таблица П.25

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	20	1650	72,2
150	20,6	1800	74
300	22,4	1950	75,2
450	26	2100	76,4
600	30,8	2250	77,6
750	36,8	2400	78,2
900	44	2550	78,8
1050	51,2	2700	79,4
1200	58,4	2850	79,94
1350	64,4	3000	80
1500	69,2		

Схема С31

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 15 %;
- коридор ± 1 (°С);
- время регулирования – не более 1500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.26.

Таблица П.26

Время t, с	Значение параметра h(t), °С	Время t, с	Значение параметра h(t), °С
0	25	1100	77,2
100	25,6	1200	79
200	27,4	1300	80,2
300	31	1400	81,4
400	35,8	1500	82,6
500	41,8	1600	83,2
600	49	1700	83,8
700	56,2	1800	84,4
800	63,4	1900	84,94
900	69,4	2000	85
1000	74,2		

Схема С32

Заданные показатели качества:

- перерегулирование не более 20 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 2000 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.27.

Таблица П.27

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	25	1375	77,2
125	25,6	1500	79
250	27,4	1625	80,2
375	31	1750	81,4
500	35,8	1875	82,6
625	41,8	2000	83,2
750	49	2125	83,8
875	56,2	2250	84,4
1000	63,4	2375	84,94
1125	69,4	2500	85
1250	74,2		

Схема С33

Заданные качественные показатели:

- перерегулирование не более 5 %;
- коридор ± 1 (°C);
- время регулирования – не более 2500 с.

Данные для построения кривой разгона приведены в табл. П.28.

Таблица П.28

Время t, с	Значение параметра h(t), °C	Время t, с	Значение параметра h(t), °C
0	25	1650	77,2
150	25,6	1800	79
300	27,4	1950	80,2
450	31	2100	81,4
600	35,8	2250	82,6
750	41,8	2400	83,2
900	49	2550	83,8
1050	56,2	2700	84,4
1200	63,4	2850	84,94
1350	69,4	3000	85
1500	74,2		

Список учебной литературы

1. Советов, Б.Я. Моделирование систем: учебник / Б.Я. Советов, С.А. Яковлев; ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина). – 7-е изд. – Москва: Юрайт, 2015. – 343 с.
2. Глазунов, Ю.Т. Моделирование процессов пищевых производств: учеб. пособие/ Ю.Т. Глазунов, А.М. Ершов, М.А. Ершов. – Москва: Колос, 2008. – 356 с.
3. Жмудь, В.А. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim [Электронный ресурс]: учеб. пособие / В.А. Жмудь; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - Новосибирск: НГТУ, 2012. - 124 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).
4. Благовещенская, М.М. Информационные технологии систем управления технологическими процессами: учебник для вузов/ М.М. Благовещенская, Л.А. Злобин. – Москва: Высш. шк., 2005. – 768 с.
5. Новиков, С.И. Оптимизация систем автоматизации теплоэнергетических процессов: учебник. Ч.1. Автоматические системы регулирования теплоэнергетических процессов с аналоговыми регуляторами [Электронный ресурс]:/С.И. Новиков; Министерство образования и науки Российской Федерации, Новосибирский государственный технический университет. - Новосибирск: НГТУ, 2011. - 284 с. (ЭБС «Университетская библиотека онлайн»).
6. Сердобинцев, С.П. Теория автоматического управления: учеб. пособие для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. – Калининград: ФГОУ ВПО «КГТУ», 2010, с. 429.
7. Ссылка на журнал в области моделирования систем и процессов - <http://www.mathnet.ru/php/journal.phtml?jrnid=mm>

Оглавление

Введение.....	3
1. Задание по курсовой работе.....	4
2. Методические указания по выполнению курсовой работы.....	5
3. Пример выполнения курсовой работы.....	9
Приложение	19
Список учебной литературы	33

Учебное издание

Владимир Иванович Устич

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Редактор Г. А. СМЕРНОВА

Подписано в печать 14.04 2019 г. Формат 60x90 (1/16). Уч.-изд. л.1,6 .
Печ. л. 2,25 . Тираж 50 экз. Заказ

Издательство федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
"Калининградский государственный технический университет"
236022, Калининград, Советский проспект, 1