

Министерство образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий



Кафедра автоматики и автоматизации
производственных процессов

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И
ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА
МЕТОДОМ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ**

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
для студентов всех специальностей

Санкт-Петербург 2003

УДК 621

Стегаличев Ю.Г., Замарашкина В.Н. Исследование статических и динамических характеристик объекта методом структурного моделирования с использованием ЭВМ: Метод. указания по выполнению лабораторных работ для студентов всех специальностей. – СПб.: СПбГУНиПТ, 2003. – 48 с.

Рассматривается порядок разработки математического и программного обеспечения, предназначенного для имитации переходных процессов в сложных многозвенных объектах управления при появлении возмущающих воздействий.

Рецензент

Канд. техн. наук, доц. О.И. Сергеенко

Одобрены к изданию советом факультета техники пищевых производств

© Санкт-Петербургский
государственный университет
низкотемпературных и пищевых
технологий, 2003

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

В методических указаниях рассматривается порядок разработки математического и программного обеспечения, предназначенного для имитации переходных процессов в сложном многозвенном объекте управления при появлении возмущающих воздействий. Разработка модели осуществляется на основе структурно-параметрического анализа объекта, декомпозиции сложного объекта на элементарные звенья и составления аналитического описания взаимосвязи входных и выходных параметров для каждого элементарного звена в статике и динамике.

Для имитации переходных процессов в объекте используется программа обработки системы уравнений элементарных звеньев методом численного интегрирования с целью определения приращений выходных переменных во времени. Все исследования проводятся на ЭВМ в программной среде Word, Excell, QBasic. Материал, изложенный в методических указаниях, обеспечивает проведение исследований статических и динамических свойств многозвенного объекта управления. Исследования проводятся в виде цикла лабораторных работ.

Последовательность выполнения работ рассматривается на примере исследования теплообменного аппарата для нагрева продукта теплоносителем. Все этапы разработки оформлены в виде программных файлов на ЭВМ и предполагается их использование в качестве шаблонов при оформлении результатов работы по индивидуальному заданию.

В объем лабораторных работ входят:

1. Составление и оформление технологической схемы объекта управления.

2. Разработка и оформление структурно-параметрической схемы объекта.

3. Разработка и оформление системы уравнений, реализующих статические и динамические свойства каждого звена, входящего в структурно-параметрическую схему.

4. Разработка и оформление программы для расчета переходных характеристик анализируемого объекта при формировании возмущающих воздействий по различным каналам.

5. Исследование статических характеристик объекта управления на имитационной модели. Оформление результатов исследования в виде графиков и математических описаний. Определение диапазона «управляемости» объекта.

6. Исследование динамических свойств объекта. Оформление результатов исследования в виде переходных характеристик и математических описаний.

2. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЪЕКТА

2.1. Составление и оформление технологической схемы объекта управления

Анализ объекта управления начинается с составления технологической схемы, на которой необходимо обозначить:

- все переменные параметры (отклики), формируемые при реализации технологической операции как на выходе объекта, так и отдельными звеньями внутри объекта;

- все внешние параметры (возмущения, действующие на объект), изменение которых выводит объект из равновесного состояния;

- конструктивные, теплотехнические, технологические характеристики и константы, которые будут использоваться при аналитическом описании отдельных звеньев, входящих в структуру объекта.

На рис. 1 представлена технологическая схема трубчатого теплообменного аппарата, в трубы которого энергоноситель (горячая вода) поступает из магистрали центрального теплоснабжения. Отработанный энергоноситель возвращается в магистраль. Нагреваемый продукт проходит через корпус теплообменника.

При работе теплообменника (ТО) формируются основные переменные (отклики):

- температура продукта на выходе $tp2$, °С;

- температура энергоносителя на выходе $te2$, °С.

Исследование реакции этих переменных на возмущения и является предметом исследования в данных лабораторных работах.

Рассмотрим какие же возмущения действуют на анализируемый объект.

Максимальный расход энергоносителя, который может обеспечить магистраль, определяется давлением в магистрали и может изменяться, например, при подключении к магистрали других потребителей. По этой причине данный параметр следует рассматривать как одно из возмущающих воздействий и определить возможный диапазон отклонений параметра $ge \pm dge$. По каналу подвода энергоносителя может поступать также возмущение в виде изменения температуры энергоносителя в магистрали $te1 \pm dte1$.

Канал подвода энергоносителя к ТО должен рассматриваться как возможный элемент управляющего воздействия на объект. Управление осуществляется изменением расхода энергоносителя через ТО, а диапазон изменения управляющего воздействия (положение регулирующего клапана) определяется величиной $ye \pm dye$.

Аналогичным образом определяются возможные возмущающие и управляющие воздействия по каналу подачи продукта в ТО:

- $gp \pm dgp$ – расход продукта из промежуточного накопителя и возможные отклонения этого параметра;
- $tp1 \pm dtp1$ – температура продукта на входе в ТО и возможные отклонения этого параметра;
- $yp \pm dyp$ – диапазон изменения положения клапана при управлении по каналу подвода продукта к ТО.

На рис. 1 обозначены также константы и конструктивные характеристики ТО, необходимые для аналитического описания операций теплообмена в аппарате:

- pp, pe – плотности продукта и энергоносителя,
- cp, ce – удельные теплоемкости продукта и энергоносителя,
- ip, ie – коэффициенты теплопередачи продукта и энергоносителя,
- fp, fe – поверхности теплопередачи продукта и энергоносителя,
- vp, ve – объемы, занимаемые в ТО продуктом и энергоносителем.

Представленная на рис. 1 технологическая схема оформлена в виде файла TEXCХТО. DOC в среде Microsoft Word [1] с использованием графического редактора MS Word Picture. При оформлении разработанной по индивидуальному заданию технологической схемы целесообразно использовать упомянутый файл в качестве шаблона, для этого необходимо:

- создать новую папку в среде Word, обозначив ее своей фамилией;
- скопировать в папку файл **ТЕХСХТО.DOC** под другим именем, например, добавив к имени числовой индекс;
- переработать схему, используя вновь образованный файл как шаблон; изменения схемы осуществляют с помощью команд редактора MS Word Picture.

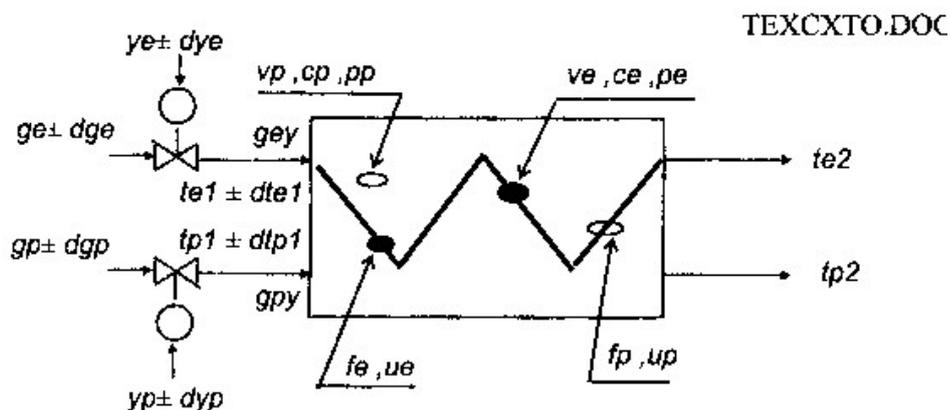


Рис. 1. Технологическая схема прямоточного теплообменника
На схеме обозначены:

- $te1 \pm dte1$ – температура энергоносителя на входе, °С;
- $tp1 \pm dtp1$ – температура продукта на входе;
- $tp2$ – температура продукта на выходе, °С;
- $te2$ – температура энергоносителя на выходе, °С;
- $ge \pm dge$ – расход энергоносителя максимальный, кг/с;
- $gp \pm dgp$ – расход продукта максимальный, кг/с;
- $ye \pm dye$ – команда на закрытие клапана подачи энергоносителя;
- $yp \pm dyp$ – команда на закрытие клапана подачи продукта;
- dge – расход энергоносителя через ТО, кг/с;
- dpy – расход продукта через ТО, кг/с;
- vp – объем продукта, находящегося в ТО, м³;
- cp – удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг · °С);
- pp – плотность продукта, кг/м³;
- ve – объем энергоносителя, находящегося в ТО, м³;
- ce – удельная теплоемкость энергоносителя, кДж/(кг · °С);
- pe – плотность энергоносителя, кг/м³;
- fe – площадь поверхности теплообмена энергоносителя, кДж/(кг · °С);
- ue – коэффициент теплопередачи энергоносителя, кДж/(с · м² · °С);
- fp – площадь поверхности теплообмена продукта, м²;
- up – коэффициент теплопередачи продукта, кДж/(с · м² · °С).

2.2. Разработка и оформление структурно-параметрической схемы объекта. Выбор математического описания звеньев

Структурно-параметрическая схема анализируемого объекта разрабатывается на основе технологической схемы путем разделения объекта на отдельные элементарные звенья.

На рис. 2 приведена структурно-параметрическая схема ТО, технологическая схема которого представлена на рис. 1. На схеме выделены 12 звеньев.

Звено 1. Это звено представляет собой сумматор и формирует промежуточную переменную gey (кг/с) – значение расхода энергоносителя через ТО. Численное значение переменной может изменяться как при изменении возмущающего воздействия – расхода энергоносителя, поступающего из магистрали $\pm dye$, так и при изменении управляющего воздействия – положения клапана, регулирующего поток энергоносителя $\pm dye$. Уравнение звена:

$$gey = (ge + dge) (1 - 0,01(ye + dye))$$

Звено 2. Аналогично звену 1 формирует значение расхода продукта gyp (кг/с) через ТО. Уравнение звена:

$$gpy = (gp + dgp)(1 - 0,01(yp + dyp))$$

Звено 3. Формирует значение промежуточной переменной $qe1$ (кДж/с) – количество энергии, поступающей в ТО с энергоносителем за секунду. Уравнение звена:

$$qe1 = ce \cdot gey \cdot (te1 + dtel)$$

Звено 4. Формирует количество энергии $qe2$ (кДж/с), которую уносит уходящий из ТО энергоноситель за секунду. Уравнение звена:

$$qe2 = ce \cdot gey \cdot te2$$

Звено 5. Формирует количество энергии $qp1$ (кДж/с), поступающей в ТО с продуктом за секунду. Уравнение звена:

$$qp1 = cp \cdot gyp \cdot (tp1 + dtpl)$$

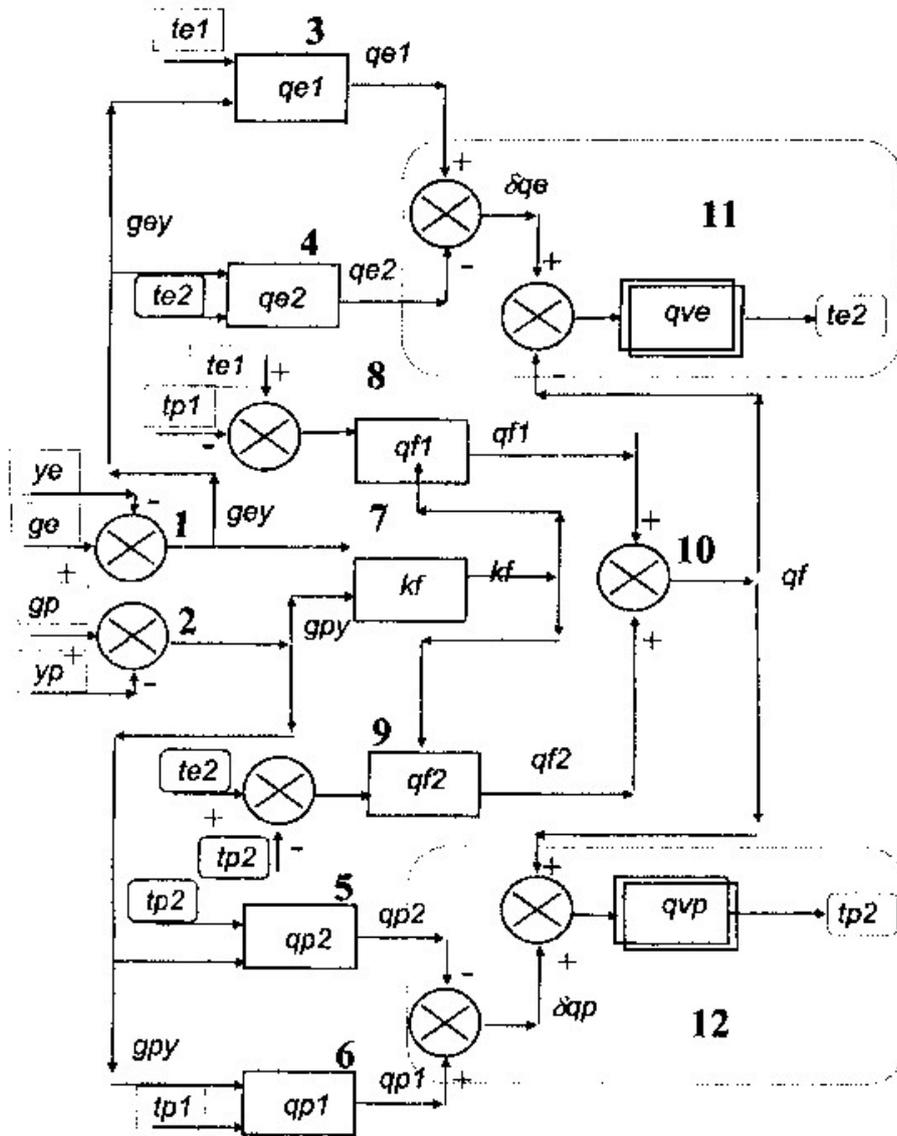


Рис. 2. Структурно-параметрическая схема прямоточного теплообменника:
 $qe1$ – количество энергии, вносимой в ТО с энергоносителем, кДж/с;
 $qe2$ – количество энергии, уходящей из ТО с энергоносителем, кДж/с;
 qve – количество энергии, аккумулированной в объеме энергоносителя, кДж;
 $qp1$ – количество энергии, вносимой в ТО с продуктом, кДж/с;
 $qp2$ – количество энергии, уходящей из ТО с продуктом, кДж/с;
 qvp – количество энергии, аккумулированной в объеме продукта, кДж;
 $qf1$ – количество энергии, переходящей через поверхность ТО на входе в ТО, кДж/с;
 $qf2$ – количество энергии, переходящей через поверхность ТО на выходе из ТО, кДж/с;
 kf – теплоток через поверхность, ТО, кДж/с · град);
 δqe – количество энергии, отдаваемой энергоносителем, кДж/с;
 δqp – количество энергии, переходящей в продукт, кДж/с;
 qf – количество энергии, передаваемой через поверхность, кДж/с/

Звено 6. Формирует количество энергии $qp2$ (кДж/с), которая уносится с уходящим из ТО продуктом за секунду. Уравнение звена:

$$qp2 = cp \cdot gpy \cdot tp2$$

Звенья 7, 8, 9 и 10 формируют количество энергии qf (кДж/с), которая переходит за секунду через поверхность теплообмена из объема энергоносителя в объем продукта. Энергосъем с поверхности теплообмена существенно зависит от скорости движения среды, и зависимость эта является нелинейной. Расходы энергоносителя gey и продукта gpy могут изменяться в широких пределах, так как являются управляемыми воздействиями на объект.

Звено 7. Формирует изменение величины теплотокота от энерго-носителя к продукту через поверхность теплообмена при изменении расхода (скорости движения) энергоносителя и продукта через ТО. Звено реализуется тремя уравнениями. Первое уравнение формирует изменение коэффициента теплопередачи от энергоносителя к стенке $ue1$ (кДж/(с·м²·°С) при изменении расхода энергоносителя через ТО:

$$ue1 = ue \left(\frac{gey}{ge} \right)^{0,4}$$

где ue – численное значение коэффициента теплопередачи при расходе энергоносителя через ТО, равном номинальному $gey = ge$ (регулирующий клапан полностью открыт).

Второе уравнение реализует изменение коэффициента теплопередачи от стенки к продукту $up1$ (кДж/с·м²·°С) при изменении расхода продукта через ТО:

$$up1 = up \left(\frac{gpy}{gp} \right)^{0,4}$$

где up – численное значение коэффициента теплопередачи при расходе продукта, равном номинальному $gpy = gp$ (регулирующий клапан полностью открыт).

Третье уравнение определяет величину теплоточка kf (кДж/(с·°С)) от энергоносителя к продукту через поверхность теплообмена ТО за секунду при разности температур в 1°С:

$$kf = \frac{1}{\frac{1}{ue1 \cdot fe} + \frac{1}{up1 \cdot fp}}$$

Звено 8. Формирует количество энергии, переходящей от энергоносителя к продукту через поверхность теплообмена за секунду на входе в ТО $qf1$ (кДж/с):

$$qf1 = kf \cdot (te1 + dtel) - (tp1 - dtpl)$$

Звено 9. Формирует количество энергии, переходящей от энерго-носителя к продукту через поверхность теплообмена на выходе из ТО за секунду $qf2$ (кДж/сек):

$$qf2 = kf \cdot (te2 - tp2)$$

Звено 10. Формирует осредненное количество энергии, передаваемой через всю поверхность теплообмена за секунду qf (кДж/сек):

$$qf = 0,5 \cdot (qf1 + qf2)$$

Звено 11. Реализует инерционные свойства объема энергоносителя ve , находящегося в ТО. На выходе звена формируется приращение температуры уходящего энергоносителя $dte2$ (град) во времени при нарушении теплового баланса ($qe1 - qe2 \neq qf$), т. е. если количество энергии, отданной энергоносителем, отличается от количества энергии, переданной через поверхность теплообмена.

При нарушении теплового баланса приращение температуры $dte2$ определяет уравнение интегрирующего звена

$$(ce \cdot pe \cdot ve) \frac{ddte2}{dt} = qe1 - qe2 - qf$$

Численное значение температуры в i -й момент времени:

$$te2(i) = te2(i - 1) + dte2(i)$$

Для перехода к численному интегрированию приращение $dte2(i)$ (°C) на i -м шаге интегрирования за интервал времени w (с) определяется уравнением:

$$dte2(i) = \frac{(qe1 - qe2 - qf)w}{ce \cdot pe \cdot ve}$$

Изменение температуры энергоносителя на выходе за интервал времени w (с) определяется уравнением:

$$tp2 = tp2 + dtp2(i)$$

В математическом описании динамических свойств звена 11 предусмотрено ограничение: при равенстве температур энергоносителя и продукта на выходе из ТО $te2 = tp2$ приращение $dte2(i)$ принимается равным нулю и интегрирование приостанавливается. Математическая запись операции, реализуемой звеном 11, имеет вид:

```
IF  $te2 - tp2 > 0$ 
THEN  $dte2(i) = (qe1 - qe2 - qf) \cdot w / (ce \cdot pe \cdot ve)$ 
ELSE  $dte2(i) = 0$ 
 $te2 = te2 + dte2(i)$ 
```

Звено 12. Реализует инерционные свойства объема продукта vp , находящегося в ТО. По аналогии со звеном 11 математическая запись операций, реализуемых звеном 12, имеет вид:

```
IF  $te2 - tp2 > 0$ 
THEN  $dtp2(i) = (qf + qp2 - qp1) \cdot w / cp \cdot pp \cdot vp$ 
ELSE  $dtp2(i) = 0$ 
 $tp2 = tp2 + dtp2(i)$ 
```

Структурно-параметрическая схема, представленная на рис. 2, оформлена в виде файла СТРСХТО.DOC в среде Microsoft Word с использованием графического редактора MS Word Picture.

Уравнения, реализуемые звеньями, оформлены в файл УРАВТО.DOC с использованием текстового редактора Win Word. При оформлении сложных формул, например для звена 7, использовался редактор формул Microsoft Equation. В прил. 1 на рис. 1 представлена распечатка этого файла.

При оформлении разработанных по индивидуальному заданию структурно-параметрической схемы и системы уравнений звеньев схемы файлы СТРСХТО. DOC и УРАВТО. DOC используются как шаблоны.

3. РАЗРАБОТКА И ОФОРМЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛИЗИРУЕМОГО ОБЪЕКТА

Система уравнений для звеньев, полученная в предыдущем разделе (УРАВТО.DOC), позволяет провести исследование статических и динамических характеристик объекта как единой системы. Процедура исследования предусматривает решение системы уравнений с целью вычисления значений выходных переменных (для рассматриваемого примера $tp2$ и $te2$) в переходном процессе в различные моменты времени. При этом исследуется реакция объекта на отдельные возмущения, поступающие по различным каналам (для примера: по каналу подачи энергоносителя $\pm dge$; $\pm dye$; $\pm dte1$; по каналу подачи продукта $\pm dgp$; $\pm dyp$; $\pm dtp1$), но может быть исследована также реакция объекта на суммарное одновременное воздействие по нескольким каналам (суммарное максимальное возмущающее воздействие).

Решение системы уравнений типа УРАВТО.DOC, в которую входят уравнения алгебраического и дифференциального типов, целесообразно осуществлять по методике численного интегрирования. В прил. 1 на рис. 2 приведена распечатка программы MTPN.BAS, подготовленной в среде Quick Basic [2], которая обеспечивает вычисление системы уравнений УРАВТО.DOC и исследование статических и динамических свойств ТО, рассмотренного на рис. 1 и 2. В комментариях по тексту программы приведены рекомендации по ее подготовке, отладке и проведению исследования объекта. Программа MTPN.BAS реализована при определенных численных значениях конструктивных и технических характеристик ТО (см. рис. 1 и прил. 1, рис. 2). Равновесное

(первоначальное статическое) состояние объекта $tp2[0] = 18,04$ °С и $te2[0] = 44,77$ °С определено номинальными значениям возмущений:
 $te [0] = 50$ °С; $tp1[0] = 10$ °С; $ge[0] = 60$ кг/с; $gp[0] = 40$ кг/с.

Номинальное значение управляющих воздействий определено 50 %-м открытием клапанов, регулирующих потоки энергоносителя и продукта:

$$ye = 50 \% \text{XPO}; \quad yp = 50 \% \text{XPO}.$$

Расчетный модуль программы состоит из двух блоков. Первый блок «Расчет значений $tp2(i)$ и $te2(i)$ в статическом режиме» предназначен для циклического пошагового решения системы уравнений УРАВТО.DOC при номинальных начальных условиях. В рассматриваемом примере вычисления в статическом состоянии осуществляются $w1=50$ циклов с шагом $M = 0,1$. При вычислении приращений переменных $tp2(i)$ и $te2(i)$ учитывается масштаб по параметру времени (интервал интегрирования) $w = 10$ с.

Второй блок расчетного модуля программы «Расчет значений $tp2(i)$ и $te2(i)$ и построение переходной характеристики – реакции на возмущение» предназначен для решения системы уравнений УРАВТО.DOC после изменения начальных условий. Для изменения начальных условий в строке «Формирование возмущений и начальных условий для исследования» необходимо ввести положительные или отрицательные отклонения одного или нескольких возмущений. Вычисления по второму блоку осуществляются до $N = 635$ циклов с шагом $M = 0,1$. Все значения $tp2(i)$ и $te2(i)$, вычисленные по программе сохраняются. По запросу программы можно вывести на принтер рассчитанные значения $tp2(i)$ и $te2(i)$ с шагом $M = 25$.

Программа предусматривает также построение графиков изменения во времени численных значений $tp2(i)$ и $te2(i)$. На график выводятся отклонения $dz(i)$ и $dz1(i)$ значений $tp2(i)$ и $te2(i)$ от их номинальных значений.

Масштаб кривых переходного процесса v и $v1$ можно изменить в разделе «Константы, формирующие работу программы».

На графике переходного процесса выделяются участки «до ввода возмущения» и «после ввода возмущения», разделенные меткой. Одновременно с графиком на экран выводятся численные

значения параметров $tp2(i)$ и $te2(i)$ в номинальном статическом состоянии и в конце цикла вычислений.

Программу MTPN.BAS рекомендуется использовать как шаблон при подготовке и оформлении собственной программы для исследования объекта. В этом случае все действия по переработке программы проводят в среде QBasic.

Переработку программы следует начинать с копирования шаблона программы под своим именем и проверки работы копии по прямому назначению.

При переработке программы следует:

А. Заменить уравнения звеньев на вновь разработанные в двух блоках программы:

- «Расчет численных значений $tp2(i)$ и $te2(i)$ в статическом режиме»;
- «Расчет значений $tp2(i)$ и $te2(i)$ и построение переходной характеристики – реакции на возмущение».

Б. Ввести новые значения в разделы:

- «Конструктивные и технологические характеристики объекта»;
- «Номинальные значения возмущающих и управляющих воздействий»;
- «Формирование возмущений и начальных условий для исследования».

При проверке переработанной программы необходимо определить условия статического равновесия при нулевых отклонениях всех возмущающих воздействий: $te2 = Z1[N]$ и $tp2 = Z[N]$ и записать их в графу «Условия статического состояния».

Если значение $tp2[N]$ не соответствует требованиям по условиям работы объекта, то необходимо изменить номинальные значения возмущающих воздействий (например, расход энергоносителя ge) для смещения точки энергетического баланса.

При проверке вида графической кривой, формируемой переработанной программой, можно изменить масштаб по оси значений $tp2(i)$ и $te2(i)$. Для изменения масштаба корректируют значения M , w , v и $v1$ в разделе «Константы, формирующие работу программы».

4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

При анализе статических характеристик объекта управления фиксируются численные значения выходных переменных только при установившихся состояниях модели.

Статические характеристики для рассмотренного выше объекта – ТО (см. рис. 1) можно получить, изучая реакцию объекта на изменение каждого из возмущающих и управляющих воздействий с использованием программы MTPN.BAS. В этом случае в строке программы «Формирование возмущений...» последовательно вводят ступенчатые отклонения одного из возмущающих воздействий. На каждой “ступени” возмущения запускают программу и после завершения расчета вносят в бланк, форма которого приведена в прил. 2, табл. 1, значение возмущающего воздействия и записывают с экрана дисплея численные значения выходных параметров в установившемся состоянии объекта: $Z[N] = tp2[N]$ и $Z1[N] = te2[N]$. Эксперимент повторяют для 6...8 положительных и отрицательных отклонений данного возмущающего воздействия. В качестве примера в прил. 2, табл. 1 приведены результаты исследования статических характеристик $tp2 = f_1(ye)$ и $te2 = f_2(ye)$ для объекта, представленного на рис. 1 и 2. Функции f_1 и f_2 определяют изменения состояния объекта при изменениях величины закрытия клапана, регулирующего подачу энергоносителя на ТО.

В математическом описании ТО принята линейная характеристика регулирующего клапана. Уравнение для звена 1 позволяет внести в графу прил. 2, табл. 1 значения расхода энергоносителя через ТО (gey) для каждого положения клапана. Такое дополнение таблицы обеспечит анализ статических характеристик объекта вида: $tp2 = f_3(gey)$ и $te2 = f_4(gey)$. В прил. 2, табл. 1 внесены также результаты исследования статических характеристик $tp2 = f_5(te1)$ и $te2 = f_6(te1)$.

Прил. 2, табл. 1 оформлена в виде шаблона ТАБЛТО.DOC в редакторе Word.

Статические характеристики объекта, полученные в результате структурного моделирования объекта, реализуются в виде графиков и алгебраического уравнения. На рис. 1–3 прил. 2 приведены примеры реализации зависимостей $tp2 = f_3(gey)$, $te2 = f_4(gey)$, $tp2 = f_5(te1)$ и $te2 = f_6(te1)$. На рис. 1 прил. 2 по данным табл. 1 прил. 2 реализована функция $tp2 = f_3(gey)$ для рабочего диапазона 10...90 % ХРО перемещения клапана, регулирующего подачу энергоносителя к ТО. График построен и обработан в среде Excell с использованием программы «Мастер

программ». Построенная зависимость нелинейна. При анализе графика с помощью «Мастера программ» построена аппроксимирующая линия тренда (жирная линия на рис. 1, прил. 2) и найдены коэффициенты степенного уравнения статики, обеспечивающие расчет в диапазоне варьирования переменных с погрешностью менее $\pm 1\%$ (зоны относительной погрешности $\delta t = \pm 1\%$ показаны на рис. 1 прил. 2 «планками погрешности»).

На рис. 2 прил. 2 по данным табл. 1 прил. 2 реализована функция $te2=f_2(ye)$. За пределы «планок погрешности» $\delta t = \pm 1\%$ не выходят результаты, полученный при аппроксимации уравнения вида полинома третьей степени.

На рис. 3 прил. 2 по данным табл. 1 прил. 2 оформлены графики статических характеристик $tp2=f_5(te1)$ и $te2=f_6(te1)$. Уравнения, реализующие эти зависимости – линейного типа. Коэффициенты уравнений определены с помощью «Мастера программ» и коэффициент корреляции в этом случае равен 1.

Рис. 1–3 прил. 2 размещены в файле СТАТО.XLS в среде Excell и оформлены программой «Мастер программ», что позволяет использовать файл СТАТО. XLS как шаблон для оформления графиков собственных статических характеристик по данным, полученным на скорректированной программе MTPN.BAS.

Исследование статики объекта с помощью программы MTPN.BAS позволяет также определить диапазон «управляемости» объекта, т. е. определить максимальные положительные и отрицательные отклонения возмущающих воздействий $\pm dte1$; $\pm dtp1$; $\pm dge$; $\pm dgp$, влияние которых на выходную переменную $tp2$ может быть скомпенсировано изменением управляющего воздействия dye или dyp .

На этом этапе может также исследоваться реакция объекта на суммарное максимальное возмущающее воздействие, т. е. одновременное отклонение возмущений по нескольким каналам, вызывающие отклонение выходного параметра $tp2$ в одну сторону.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Программа MTPN.BAS позволяет рассчитать и построить переходную характеристику (разгонную кривую) объекта как реакцию на скачкообразное изменение любого возмущающего воздействия на входе объекта.

Начальное состояние системы – равновесный режим (статика), при котором все входные и выходные параметры (возмущающие и управляющие воздействия) заданы своими номинальными значениями (см. прил. 1, рис. 2). Изменение возмущающего воздействия вводится на строке программы «Формирование возмущающих воздействий...», после чего производится запуск программы. Рекомендуется исследовать реакцию объекта как на положительное, так и на отрицательное отклонение возмущающего воздействия от равновесного состояния.

Программа MTPN.BAS формирует на экране одновременно две переходные характеристики $dtp2 = f_1(\tau)$ и $dte2 = f_2(\tau)$ как реакцию объекта на внесенное возмущение. На рис. 4, прил. 2 представлены переходные характеристики для ТО, схема которого представлена на рис. 1 и 2, при подаче на вход объекта возмущения $dte1 = +20^\circ\text{C}$. Распечатка графика переходной характеристики как реакции на заданное возмущающее или управляющее воздействие может быть получена реализацией следующего алгоритма:

- вызвать редактор Word, запустить файл ГРАФТО.DOC и свернуть его;
- вызвать компилятор QB в среде Windows;
- вызвать программу MTPN.BAS на экран;
- ввести значение отклонения возмущения в строке программы «Формирование возмущающих воздействий...», например, $dtp1 = 10^\circ\text{C}$;
- запустить программу MTPN.BAS (клавиша «F5»);
- после завершения работы программы перенести рисунок графика переходной характеристики с экрана в буфер обмена компьютера (клавиша «Print Screen»);
- перейти в файл ГРАФТО.BAS в редакторе Word (клавиши «Alt» + «Tab»);
- командой «Вставить» скопировать график из буфера обмена в ГРАФТО. BAS;
- присвоить имя файлу рисунка в Word и перенести файл в свою рабочую папку;

– возвратиться в программу MTPN.BAS, внести следующее возмущающее воздействие и добавить вновь полученный график в созданный файл;

– печатать рисунки из своей рабочей папки командой «Печать» редактора Word.

При необходимости корректировать рисунки графика на экране:

– через меню Word запустить редактор Paint;

– в меню «Правка» командой «Вставить» скопировать график из буфера обмена;

– корректировать рисунок используя меню редактора Paint (команда «Обратить цвета» в меню «Файл»; в меню «Свойства» подменю «Графика» включить кнопку «Диффузия» для снятия сетки и т. п.);

– сохранить скорректированный рисунок в своей рабочей папке и печатать его.

В программе MTPN.BAS предусмотрена возможность по запросу программы выводить на печать таблицы данных для построения переходных характеристик $dtp2 = f_1(\tau)$ и $dte2 = f_2(\tau)$. На рис. 4, прил. 2 приведен пример такой таблицы для возмущения $dte1 = 20^\circ\text{C}$.

График переходной характеристики необходимо обработать следующим образом:

– формируется шкала по оси времени – от начала оси до момента внесения возмущения (две симметричные метки вокруг шкалы времени) $\Delta\tau_{\text{ст}} = w1 \cdot w$ с, в шаблоне $\Delta\tau_{\text{ст}} = 10 \cdot 50 = 500$ с;

– формируются шкалы для определения численных значений $tp2$ и $te2$ по тарировочным отрезкам от численных значений параметров при статическом режиме $tp2[w1]$ и $te2[w1]$ до численных значений параметров в конце процесса интегрирования $tp2[N]$ и $te2[N]$. Численные значения тарировочных точек выводятся в левом верхнем углу распечатки графика.

На основании переходных характеристик объекта, представленных на рис. 4, прил. 2, определяют коэффициенты уравнения динамики и передаточную функцию объекта. Уравнения динамики реализуют для каждого канала возмущения, а также отдельно для положительных и отрицательных отклонений возмущающего воздействий от равновесного состояния.

Для математического описания свойств объекта по переходной характеристике используют дифференциальные уравнения и передаточные функции типовых динамических звеньев, аппроксимирующие график переходной функции [3].

Для примера переходные кривые, представленные на рис. 4, прил. 2 $dtp2 = f_1(dte1, \tau)$ и $dte2 = f_2(dte1, \tau)$, аппроксимированы

дифференциальными уравнениями и передаточными функциями инерционного звена первого порядка.

Аппроксимацию переходных характеристик дифференциальными уравнениями с наименьшей погрешностью, в том числе и для уравнений второго порядка и выше, можно реализовать, используя функцию «Поиск решения» программы Excel [4]. Для определения коэффициентов уравнения динамики объекта с применением функции «Поиск решения» необходимо оформить результаты расчета переходной характеристики по программе MTPN.BAS в табличной форме. Вывод на печать таблицы результатов осуществляется по запросу программы MTPN.BAS в форме, представленной на рис. 4, прил. 2.

В прил. 2, рис. 5 представлены результаты поиска для зависимости $dtp2 = f_1(dte1, \tau)$ оптимальных значений коэффициентов T и k уравнения:

$$T \frac{ddtp2}{d\tau} + dtp2 = kdte1$$

Критерием оптимизации является минимальное значение суммарной квадратичной ошибки:

$$W = \sum (dtp2(i)_T - dtp2(i)_p)^2 \rightarrow \min,$$

где $dtp2(i)_T$ – численные значения параметра в i -й момент времени, полученные в результате эксперимента (распечатка рис. 4, прил. 2); $dtp2(i)_p$ – численные значения параметра в i -й момент времени, полученное расчетом по уравнению

$$dtp2 = k \left(1 - e^{-\frac{\tau}{T}} \right)$$

На рис. 5, прил. 2 представлены результаты расчета, а также графики, построенные по табличным и расчетным (пунктир) данным. Рис. 5, прил. 2 оформлен в виде шаблона в файле СТАТО.XLS. Для обработки результатов исследования объекта по индивидуальному заданию необходимо ввести в шаблон новые значения параметра, полученные при исследовании объекта и запустить функцию «Поиск решения».

На рис. 6, прил. 2 представлен шаблон для определения коэффициентов уравнения динамики второго порядка:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \Delta y}{dt^2} + (T_1 + T_2) \frac{d \Delta y}{dt} + \Delta y = k \Delta x$$

В шаблоне рис. 6, прил. 2 обрабатывались результаты исследования динамики ТО, в котором проточным энергоносителем нагревается циркулирующий по замкнутому контуру продукт. При этом в систему уравнений, описывающих состояние объекта, добавляется уравнение для инерционного звена 13 (см. рис. 1, прил. 1).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Изучение методики работы с шаблонами, формирующими модель многозвенного объекта управления

Содержание работы

1. В редакторе Word в папке “САТПО” сформировать новую папку, обозначив ее своей фамилией.

2. Скопировать во вновь образованную папку файлы-шаблоны: ТЕХСХТО.DOC; СТРСХТО.DOC; УРАВТО.DOC; МТПН.BAS; ТАБЛТО.DOC; ГРАФТО.DOC, СТАТО.XLS, а также при необходимости компилятор QBasic.

3. Запуская поочередно файлы, на примере теплообменного аппарата ознакомиться с методикой структурно-параметрического анализа, формирования математического описания (уравнений материального и энергетического баланса) отдельных звеньев, образующих структуру теплообменного аппарата, алгоритмом взаимодействия отдельных звеньев и параметров в схеме объекта.

4. Вызвать компилятор QBasic и открыть программу МТПН.BAS. По комментариям в тексте программы и описанию в данном пособии изучить структуру программы и порядок ее использования. На примере теплообменного аппарата изучить порядок и последовательность ввода в программу:

- уравнений звеньев объекта;
- конструктивных и технологических характеристик объекта;
- номинальных значений параметров объекта, определяющих начальное статическое состояние;
- возмущающих и управляющих воздействий на объект;
- параметров настройки программы, определяющих периодичность и продолжительность интегрирования, масштаб изображения переменных на графике.

5. По заданию преподавателя внести изменения в технологическую схему объекта.

Варианты индивидуального задания:

1. Перейти в теплообменнике от схемы прямотока к схеме противотока.

2. Перейти в теплообменнике от операции нагрева продукта к операции охлаждения (прямоток).

3. То же, но противоток.

4. Рассмотреть технологическую схему нагрева подвижным энергоносителем неподвижного продукта.

5. Рассмотреть технологическую схему охлаждения подвижного продукта неподвижным энергоносителем.

6. Перейти в теплообменнике от нагрева потока жидкого продукта к нагреву потока воздуха (прямоток).

7. То же, но противоток.

8. Перейти в теплообменнике от охлаждения потока жидкого продукта к охлаждению воздуха (прямоток).

9. Перейти в теплообменнике к использованию в качестве энергоносителя пара (прямоток).

10. То же, но противоток.

11. Рассмотреть технологическую схему с запаздыванием по каналу подачи энергоносителя в теплообменник.

12. Рассмотреть технологическую схему с запаздыванием по каналу подачи продукта в теплообменник.

6. Переработать технологическую схему, структурно-параметрическую схему, описание уравнений звеньев объекта и текст программы MTPN.BAS, приведя их в соответствие с индивидуальным заданием.

7. Внести изменения в соответствии с индивидуальным заданием в файлы TEXCXTO.DOC; СТРСХТО.DOC; УРАВТО.DOC; MTPN.BAS, используя их как шаблоны (шаблоны при этом сохранить).

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Краткое описание технологической схемы, а также методики формирования структурной схемы и системы уравнений математического описания звеньев объекта.

2. Дискету с записью файлов-шаблонов, необходимых для оформления этапов разработки модели объекта. На дискету записываются также файлы, разработанные по индивидуальному заданию.

3. Распечатку программного файла MTPN.BAS, разработанного по индивидуальному заданию и описание методики его использования.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Исследование статических характеристик многозвенного объекта управления

Содержание работы

1. Используя имитационную модель объекта MTPN.BAS, провести экспериментальное определение статических характеристик теплообменного аппарата по заданным преподавателем каналам возмущения и управления.

Варианты индивидуального задания:

1. $te2 = f_1(te1)$ и $te2 = f_2(ye)$
2. $tp2 = f_1(te1)$ и $tp2 = f_2(ye)$
3. $te2 = f_1(tp1)$ и $te2 = f_2(ye)$
4. $tp2 = f_1(tp1)$ и $tp2 = f_2(ye)$
5. $te2 = f_1(te1)$ и $te2 = f_2(yp)$
6. $te2 = f_1(te1)$ и $tp2 = f_2(yp)$
7. $te2 = f_1(tp1)$ и $te2 = f_2(yp)$
8. $tp2 = f_1(tp1)$ и $tp2 = f_2(yp)$
9. $te2 = f_1(ge)$ и $te2 = f_2(ye)$
10. $tp2 = f_1(ge)$ и $tp2 = f_2(ye)$
11. $te2 = f_1(gp)$ и $te2 = f_2(ye)$
12. $tp2 = f_1(gp)$ и $tp2 = f_2(ye)$
13. $te2 = f_1(ge)$ и $te2 = f_2(yp)$
14. $tp2 = f_1(ge)$ и $tp2 = f_2(yp)$
15. $te2 = f_1(gp)$ и $te2 = f_2(ye)$
16. $tp2 = f_1(gp)$ и $tp2 = f_2(yp)$

В процессе экспериментального исследования в строке «Формирование возмущений...» программы MTPN.BAS устанавливают положительные и отрицательные отклонения аргумента $dq1$, $dq2$, dye , dyp , dge , dgp на величину 0,1 ожидаемого диапазона варьирования и вносят значения аргумента в табл. 1, запускают программу «F5» и после завершения расчета из информационного сообщения в верхней левой части экрана заносят в таблицу эксперимента численные значения отклика $te2$, $tp2$. Формирование возмущений повторяют 6–8 раз при различных отклонениях аргумента.

Результаты эксперимента оформляют в виде двух таблиц типа ТАБЛТО.DOC для функций f_1 и f_2 , определенных индивидуальным заданием.

2. Используя шаблоны СТАТО.XLS в среде Excell обработать результаты эксперимента и построить графики функций f_1 и f_2 , определить вид и численные значения коэффициентов математического описания этих функций (уравнения статики). Результаты работы по программе записать в виде файла в свою папку.

3. Анализируя таблицы экспериментальных данных и графики функций f_1 и f_2 , определить пределы управляемости объекта по рассмотренным каналам возмущения и управления.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Краткую формулировку задачи и метода исследования статических характеристик объекта.

2. Таблицы результатов экспериментального определения функциональных зависимостей f_1 и f_2 .

3. Графики и уравнения, реализующие функциональные зависимости f_1 и f_2 .

4. Результаты анализа пределов управляемости объекта по заданным каналам возмущения и управления.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 **Исследование динамических характеристик** **многозвенного объекта управления**

Содержание работы

1. Используя иммитационную модель объекта МТРN.BAS провести экспериментальное определение переходных (“разгонных”) характеристик теплообменного аппарата по заданным преподавателем каналам возмущения и управления.

Переходные характеристики необходимо получить в форме таблиц и графиков реакции объекта на положительное и отрицательное скачкообразное отклонение возмущающих и управляющих воздействий типа представленных на рис. 4, прил. 2.

Варианты заданий:

$te2 = F_1(\tau)$ и $tp2 = F_2(\tau)$ при $dte1 = +10$ °С;

$te2 = F_3(\tau)$ и $tp2 = F_4(\tau)$ при $dte1 = -10$ °С;

$te2 = F_5(\tau)$ и $tp2 = F_6(\tau)$ при $dye = 40$ %ХРО;

$te2 = F_7(\tau)$ и $tp2 = F_8(\tau)$ при $dye = -40$ %ХРО.

2. Каждый график, полученный при эксперименте, следует перенести в редактор Word в виде точечного рисунка и вставить в файл ГРАФТО.DOC, открытый в личной папке.

3. Обработать графики переходных характеристик по распечаткам:

– нанести масштабную сетку на оси;

– обозначить численные значения скачка возмущающего или управляющего воздействия для данного графика;

– обозначить на оси τ графика отрезок, определяющий время запаздывания τ_{zo} и постоянную времени объекта t_0 ;

4. На основе полученных результатов, используя шаблоны СТАТО.XLS сформировать уравнения динамики объекта и передаточные функции для канала возмущения и канала управления, а также определить ограничения на область применения этих уравнений.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. Краткую формулировку задачи и метода исследования динамических свойств объекта.

2. Обработанные графики переходных характеристик объекта для заданных каналов возмущения и управления.

3. Уравнения динамики и передаточные функции объекта, реализованные на основе переходных характеристик.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Стинсон К.** Эффективная работа в Windows 95 / Пер. с англ. – СПб.: Питер, 1996.– 784 с.
2. **Зельднер Г.** Программируем на языке Quick BASIC 4.5. – М.: АБФ, 1996.– 432 с.
3. **Митин В.В. и др.** Автоматика и автоматизация производственных процессов в мясной и молочной промышленности. – М.: Агропромиздат, 1987. – 240 с.
4. **Штайнер И., Валентин Р.** Excell 7 для Windows 95. Справочник / Пер. с нем.– М.: Восточная книжная компания, 1997. – 448 с.

Приложение 1

УРАВТО.DOC

Математическое описание структурно-параметрической схемы теплообменника (ТО) – нагревание циркулирующего продукта (обозначение и размерность переменных см. на рис. 1,2)

Звено 1. Формирует значение расхода энергоносителя через ТО с учётом положения клапана регулирующего поток энергоносителя.

$$gey = (ge + dge) * (1 - 0.01 * (ye + dye)), \text{ кг/с.}$$

Звено 2. Формирует значение расхода продукта через ТО с учётом положения клапана регулирующего поток продукта.

$$gpy = (gp + dgp) * (1 - 0.01 * (yp + dyp)), \text{ кг/с.}$$

Звено 3. Формирует количество энергии поступающей в ТО с энергоносителем за секунду.

$$qe1 = ce * gey * (te1 + dte1), \text{ кДж/с.}$$

Звено 4. Формирует количество энергии уходящей из ТО с энергоносителем за секунду.

$$qe2 = ce * gey * te2, \text{ кДж/с.}$$

Звено 5. Формирует количество энергии поступающей в ТО с продуктом за секунду.

$$qp1 = cp * gpy * (tp1 + dtp1), \text{ кДж/с.}$$

Рис. 1. Математическое описание звеньев – шаблон УРАВТО.DOC

Звено 6. Формирует количество энергии уходящей из ТО с продуктом за секунду.

$$qr2 = cp * gpy * tp2, \text{ кДж/с.}$$

Звено 7. Формирует изменение величины теплоточа от энергоносителя к продукту через поверхность теплообмена при изменении расхода (скорости движения) энергоносителя и продукта через ТО.

7.1. Значения коэффициента теплопередачи от энергоносителя к стенке в функции от изменения расхода энергоносителя:

$$ue1 = ue * \left(\frac{gey}{ge} \right)^{0.4}, \text{ кДж / (с * м}^2 \text{ * } ^\circ\text{C)},$$

ue - численное значение коэффициента теплопередачи при $gey = ge$
Уравнение формирует нелинейную функциональную зависимость количества тепла передаваемого через стенку теплообменника от количества энергоносителя поступающего через регулирующий клапан.

Учѐт нелинейности необходим, так как при управлении объектом расход энергоносителя может изменяться в широком диапазоне:

$$0.1 * ge < gey > 0.9 * ge .$$

7.2. Значения коэффициента теплопередачи от стенки к продукту в функции от изменения расхода продукта, по аналогии с 7.1:

$$up1 = up * \left(\frac{gpy}{gp} \right)^{0.4}, \text{ кДж / (с * м}^2 \text{ * } ^\circ\text{C)},$$

up - численное значение коэффициента теплопередачи при $gpy = gp$

Рис. 1. Математическое описание звеньев – шаблон УРАВТО.ДОС
(продолжение)

7.3. Величина теплотокота от энергоносителя к продукту через поверхность ТО за сек. при разности температур в один градус:

$$kf = \left(\frac{1}{\frac{1}{ue1 * fe} + \frac{1}{up1 * fp}} \right), \text{ кДж / (с * } ^\circ\text{C)}.$$

Звено 8. Формирует количество энергии переходящей от энергоносителя к продукту через поверхность теплообмена на входе в ТО за сек.

$$qf1 = kf * (te1 + dtel) - (tp1 + dtp1), \text{ кДж / с.}$$

Звено 9. Формирует количество энергии переходящей от энергоносителя к продукту через поверхность теплообмена на выходе из ТО за секунду.

$$qf2 = kf * (te2 - tp2), \text{ кДж / с}$$

Звено 10. Формирует осреднённое количество энергии передаваемой через поверхность за сек.

$$qf = 0.5 * (qf1 + qf2), \text{ кДж/с.}$$

Звено 11. Реализует влияние инерционных свойств объёма энергоносителя ve находящегося в ТО на изменение численного значения температуры энергоносителя на выходе из ТО в динамике (при нарушении теплового баланса $qe1 - qe2 \neq qf$). При нарушении теплового баланса, приращение температуры $dte2$ определяет уравнение интегрирующего звена:

$$(ce * pe * ve) \frac{ddte2}{dt} = (qe1 - qe2 - qf)$$

Рис. 1. Математическое описание звеньев – шаблон УРАВТО.ДОС
(продолжение)

Численное значение температуры в i -ый момент времени :

$$te2(i) = te2(i-1) + dte2(i)$$

Для перехода к численному интегрированию приращение $dte2(i)$ на i -м шаге интегрирования за интервал времени w , с, определяется уравнением:

$$dte2(i) = (qe1 - qe2 - qf) * w / (ce * pe * ve), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Изменение температуры энергоносителя на выходе за интервал времени w , с, определяется уравнением:

$$te2 = te2 + dte2(i), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Интегрирование прекращается, если $te2 = tp2$.

Математическая запись операции реализуемых звеном 11 имеет вид:

$$IF \ te2 - tp2 > 0$$

$$THEN \ dte2(i) = (qe1 - qe2 - qf) * w / (ce * pe * ve)$$

$$ELSE \ dte2(i) = 0$$

$$te2 = te2 + dte2(i), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Звено 12. Реализует влияние инерционных свойств объёма продукта vp находящегося в ТО на изменение численного значения температуры продукта на выходе из ТО в динамике (при нарушении теплового баланса $qp2 - qp1 \neq qf$).

По аналогии со звеном 11 математическая запись операций реализуемых звеном 12 имеет вид:

$$IF \ te2 - tp2 > 0$$

$$THEN \ dtp2(i) = (qf + qp2 - qp1) * w / (cp * pp * vp)$$

$$ELSE \ dtp2(i) = 0;$$

$$tp2 = tp2 + dtp2(i), \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Рис. 1. Математическое описание звеньев – шаблон УРАВТО.ДОС
(продолжение)

Звено 13. Только для варианта нагрева продукта циркулирующего по замкнутому контуру.

Реализует влияние инерционных свойств объёма продукта v_0 , находящегося в зоне конвекционного теплообмена на изменение численного значения температуры продукта $tp3$ в наиболее удалённой от поверхности теплообмена точке ТО.

В динамике (при нарушении теплового баланса в объёме конвективного теплообмена v_0) приращение температуры $dtp3$ определяет уравнение интегрирующего звена:

$$(cp * pp * v_0) \frac{dte3}{dt} = qo2 - qo1 = cp * gp * tp3 - cp * gp * tp2 ,$$

где $qo1$ - количество энергии переходящей при циркуляции из зоны поверхностного теплообмена v_p в зону конвективного теплообмена v_0 , кДж/с;

$qo2$ - количество энергии возвращаемой при циркуляции продукта из объёма v_0 в объём v_p , кДж/с.

В статическом состоянии $tp3 = tp2$, в динамике:

$$tp3(i) = tp3(i - 1) + dtp3(i).$$

Математическая запись операций реализуемых звеном 13:

$$dtp3(i) = gp * (tp3 - tp2) * w / (pp * v_0)$$

$$tp3 = tp3 + dtp3(i).$$

Рис. 1. Математическое описание звеньев – шаблон УРАВТО.ДОС
(окончание)

'MTPN.BAS

'Решение системы уравнений и построение переходных характеристик
'при исследовании динамики проточного теплообменного аппарата
'нагревающего продукт.
'Инструкция по подготовке и использованию программы.
'Программа подготовлена для исследования аппарата работающего по схеме
'прямотока энергоносителя и продукта.
'Технологическая схема и обозначения основных параметров на рис.1.
'Предусмотрена возможность исследования переходных характеристик объекта
'как реакции на ступенчатое изменение возмущающих воздействий.
'Графики изменения во времени выходных параметров исследуемого объекта-
'температуры продукта на выходе аппарата (tp2) и температуры отработавшего
'энергоносителя (te2) формируются процедурой численного интегрирования
'системы алгебраических и дифференциальных уравнений звеньев образующих
'структурно-параметрическую схему объекта представленную на рис.2.
'Уравнения звеньев приведены в описании рис.2.
'Изменения возмущений можно задавать как предельными отклонениями, так и
'долями от предела варьирования данного возмущения.
'Предусмотрена возможность формирования возмущающего воздействия
'одновременно по нескольким каналам.
'При подготовке программы к исследованию конкретного теплообменника,
'необходимо ввести численные значения конструктивных и технологических
'характеристик объекта (cp,ce,pp,pe,up,ue,vp,ve,fp,fe).
'При вводе соблюдать размерность указанную в описании уравнений звеньев.
'В программу вводятся также номинальные численные значения возмущающих
'и управляющих воздействий на объект(tp1[0],te1[0],gp[0],ge[0],yp[0],ye[0]).
'До начала исследования необходимо установить статическое состояние
'объекта для чего следует ввести в строку программы "Условия статического

Рис. 2. Текст программы «MTPN.BAS»

'состояния":tp2=tp1;te2=te1,и запустить программу.

'После стабилизации записать с экрана значения te2[N]=z1[N] и tp2[N]=z[N].

'Записать: te2=z1[N];tp2=z[N] в строку программы "Условия статического 'состояния".

'При исследовании объекта формируют возмущающие воздействия в виде 'положительных и отрицательных отклонений от номинальных значений 'параметров - dtp1;dte1;dgp;dge;dyp;due.

'Численные значения возмущающих воздействий заносят в строку программы: "'Формирование возмущений и начальных условий для исследования",затем 'запускают программу.

CLS

'Константы формирующие работу программы.

'Номер шага интегрирования - j.

'Шаг интегрирования - M.

M = .1

'Максимальное число шагов интегрирования - N.

N = 635

'Число шагов интегрирования при статическом режиме (до возмущения) - w1.

w1 = 50

'Масштаб по параметру времени (интервал интегрирования) - w , сек.

w = 10

'Масштаб графического изображения отклонения параметра tp2[i] от номинала '(dz(i)) - v1.

v1 = 20

'Масштаб графического изображения отклонения параметра te2[i] от номинала '(dz1(i)) - v.

v = 10

Рис. 2. Текст программы «MTPN.BAS»
(продолжение)

'Подготовка ячеек памяти для хранения массивов.

DIM dte2(N), dtp2(N), z(N), z1(N), dz(N), dz1(N)

'Конструктивные и технологические характеристики объекта

'Коэффициент теплоёмкости энергоносителя и продукта, кДж/(кг*град).

ce = 4.2: cp = 4.1

'Коэффициент теплоотдачи энергоносителя и продукта, кДж/(сек.*м²*град.)

ce = .065: cp = .06

'Плотность энергоносителя и продукта, кг/м³

pe = 1000: pp = 1000

'Поверхность теплопередачи от энергоносителя и продукта, м²

fe = 400: fp = 400

'Объём, занимаемый энергоносителем и продуктом, м³

ve = 100: vp = 100

'Номинальные значения возмущающих и управляющих воздействий

'Температура энергоносителя на входе, град.

te1 = 50

'Расход энергоносителя на входе, кг/сек.

ge = 60

'Температура продукта на входе, град.

tp1 = 10

'Расход продукта на входе, кг/сек.

gp = 40

'Управляющее воздействие по каналу расхода энергоносителя, % ХРО.

ye = 50

'Управляющее воздействие по каналу расхода продукта, % ХРО.

Рис. 2. Текст программы «MTPN.BAS»
(продолжение)

```

ур = 50
'Условия статического состояния объекта.
'Температура энергоносителя на выходе, град.
te2 = 44.77
'Температура продукта на выходе, град.
tp2 = 18.04
Расчет значений tp2[i] и te2[i]
'в статическом режиме (продолжительность w1 циклов).
FOR i = 1 TO w1 STEP M
'Звено 1
gey = (ge + dge) * (1 - .01 * (ye + dye))
'Звено 2
gpy = (gp + dgp) * (1 - .01 * (yp + dyp))
'Звено 3
qe1 = ce * gey * (te1 + dte1)
'Звено 4
qe2 = ce * gey * te2
'Звено 5
qp1 = cp * gpy * (tp1 + dtp1)
'Звено 6
qp2 = cp * gpy * tp2
'Звено 7
ue1 = ue * (gey / ge) ^ .4
up1 = up * (gpy / gp) ^ .4
kf = 1 / (1 / (ue1 * fe)) + (1 / (up1 * fp))
'Звено 8
qf1 = kf * ((te1 + dte1) - (tp1 + dtp1))

```

Рис. 2. Текст программы «MTPN.BAS»
(продолжение)

```

'Звено 9
  qf2 = kf * (te2 - tp2)
'Звено 10
  qf = .5 * (qf1 + qf2)
'Звено 11
  IF te2 - tp2 > 0 THEN dte2(i) = (qe1 - qe2 - qf) * w / (ce * pe * ve)
  ELSE dte2(i) = 0
  te2 = te2 + dte2(i)
'Звено 12
  IF te2 - tp2 > 0 THEN dtp2(i) = (qf + qp1 - qp2) * w / (cp * pp * vp)
  ELSE dtp2(i) = 0
  tp2 = tp2 + dtp2(i)
'Сохранение результатов
  z1(i) = te2
  z(i) = tp2
'Вывод на экран z(i)
  PRINT "z(";
  PRINT ; i;
  PRINT ")=";
  PRINT USING "###.##"; z(i)
NEXT i
'Формирование возмущений и начальных условий для исследования
'Температура энергоносителя на входе (-10 ... +20), град.
  dte1 = 0
'Расход энергоносителя на входе (-20 ... +20), кг/сек.
  dge = 0
'Температура продукта на входе (-8 ... +10), град.

```

Рис. 2. Текст программы «MTPN.BAS»
(продолжение)

```

dtp1 = 0
'Расход продукта на входе (-10 ... +20), кг/сек.
dgp = 0
'Управляющее воздействие по каналу расхода энергоносителя
' (-40 ... +40), % ХРО.
dye = 0
'Управляющее воздействие по каналу расхода продукта
' (-40 ... +40), % ХРО.
dyp = 0
'Расчет значений tp2[i], (z) и te2[i],(z1) и построение переходной
'характеристики - реакции на возмущение.
FOR i = w1 + 1 TO N STEP M
'Звено 1
gey = (ge + dge) * (1 - .01 * (ye + dye))
'Звено 2
gpy = (gp + dgp) * (1 - .01 * (yp + dyp))
'Звено 3
qe1 = ce * gey * (te1 + dte1)
'Звено 4
qe2 = ce * gey * te2
'Звено 5
qp1 = cp * gpy * (tp1 + dtp1)
'Звено 6
qp2 = cp * gpy * tp2
'Звено 7
ue1 = ue * (gey / ge) ^ .4
up1 = up * (gpy / gp) ^ .4

```

Рис. 2. Текст программы «МТРN.BAS»
(продолжение)

```

kf = 1 / (1 / (ue1 * fe)) + (1 / (up1 * fp))
'Звено 8
qf1 = kf * ((te1 + dte1) - (tp1 + dtp1))
'Звено 9
qf2 = kf * (te2 - tp2)
'Звено 10
qf = .5 * (qf1 + qf2)
'Звено 11
IF te2 - tp2 > 0 THEN dte2(i) = (qe1 - qe2 - qf) * w / (ce * pe * ve)
ELSE dte2(i) = 0
te2 = te2 + dte2(i)
'Звено 12
IF te2 - tp2 > 0 THEN dtp2(i) = (qf + qp1 - qp2) * w / (cp * pp * vp)
ELSE dtp2(i) = 0
tp2 = tp2 + dtp2(i)
'Сохранение результатов
z1(i) = te2
z(i) = tp2
'Вывод на экран z(i)
PRINT "z(";
PRINT ; i;
PRINT ")=";
PRINT USING "###.##"; z(i)
NEXT i
'Определение отклонений от номинала.
FOR i = 1 TO N STEP M
dz(i) = z(i) - z(w1)

```

Рис. 2. Текст программы «MTPN.BAS»
(продолжение)

```

dz1(i) = z1(i) - z1(w1)
NEXT i
'Печатать данные для оформления графика.
INPUT "Печатать результаты? Да -1, Нет -0"; r
IF r = 0 THEN GOTO 10
FOR i = w1 TO N STEP 250 * M
LPRINT "      dtp2(";
LPRINT ; i - w1;
LPRINT ")=";
LPRINT USING "###.##"; dz(i);
LPRINT " dte2(";
LPRINT ; i - w1;
LPRINT ")=";
LPRINT USING "###.##"; dz1(i)
NEXT i
'Построение графика изменений во времени dz(i) и dz1(i).
10 CLS
SCREEN 12
LOCATE 1, 1
PAINT STEP(1, 1), 15
'Оси
FOR j = 5 TO 450
PSET (5, j), 0
NEXT j
FOR j = 5 TO 635
PSET (j, 225), 0
NEXT j

```

Рис. 2. Текст программы «MTPN.BAS»
(продолжение)

```

'Координаты dz(i),dz1(i)
'до скачка (статическое состояние).
FOR i = 1 TO w1 - 1 STEP M
x = 5 + i
y = 225 - v1 * dz(i)
yv = 225 - v * dz1(i)
PSET (x, y), 2
PSET (x, yv), 9
NEXT i
'метка момента ввода возмущения.
x = 5 + w1
PSET (x, 220), 0
PSET (x, 230), 0
'после скачка
FOR j = w1 + 1 TO N STEP M
x = 5 + i
y = 225 - v1 * dz(i)
yv = 225 - v * dz1(i)
PSET (x, y), 2
PSET (x, yv), 9
NEXT i
'Численные значения контрольных точек
PRINT "z(w1)="; USING " ###.###"; z(w1)
PRINT "z1(w1)="; USING " ###.###"; z1(w1)
PRINT "z(N)="; USING " ###.###"; z(N)
PRINT "z1(N)="; USING " ###.###"; z1(N)
END

```

Рис. 2. Текст программы «MTPN.BAS»
(окончание)

Приложение 2

ТАБЛТО.DOC

Таблица 1

Исследование статических характеристик теплообменника

$tp2 = f_1(ye), te2 = f_2(ye), tp2 = f_3(gey), te2 = f_4(gey).$				
Возмущение dye % ХРО	Закрытие клапана $ye, \% \text{ ХРО}$	Расход энергоносителя $gey, \text{ кг/с}$	Температура продукта $tp2, ^\circ\text{C}$	Температура энергоносителя $te2, ^\circ\text{C}$
- 40	10	54	20,09	46,35
- 30	20	48	19,65	46,07
- 20	30	42	19,17	45,74
- 10	40	36	18,64	45,31
0	50	30	18,04	44,77
+10	60	24	17,35	44,02
+20	70	18	16,53	42,92
+30	80	12	15,48	41,08
+ 40	90	6	14,01	37,12
$tp2 = f_5(te1), te2 = f_6(te1)$				
Возмущение $dte1, ^\circ\text{C}$	Температура энергоносителя на входе $te1, ^\circ\text{C}$	Температура продукта на выходе $tp2, ^\circ\text{C}$	Температура энергоносителя на выходе $te2, ^\circ\text{C}$	
-15	45	15,03	31,73	
-10	50	16,03	36,08	
-5	55	17,04	40,42	
0	60	18,04	44,77	
+5	65	19,04	49,11	
+10	70	20,05	53,46	
+15	75	21,05	57,81	
+20	80	22,06	62,15	

<i>gey</i>	<i>tp2</i>
6	14,01
12	15,48
18	16,53
24	17,35
30	18,04
36	18,64
42	19,17
48	19,65
54	20,09

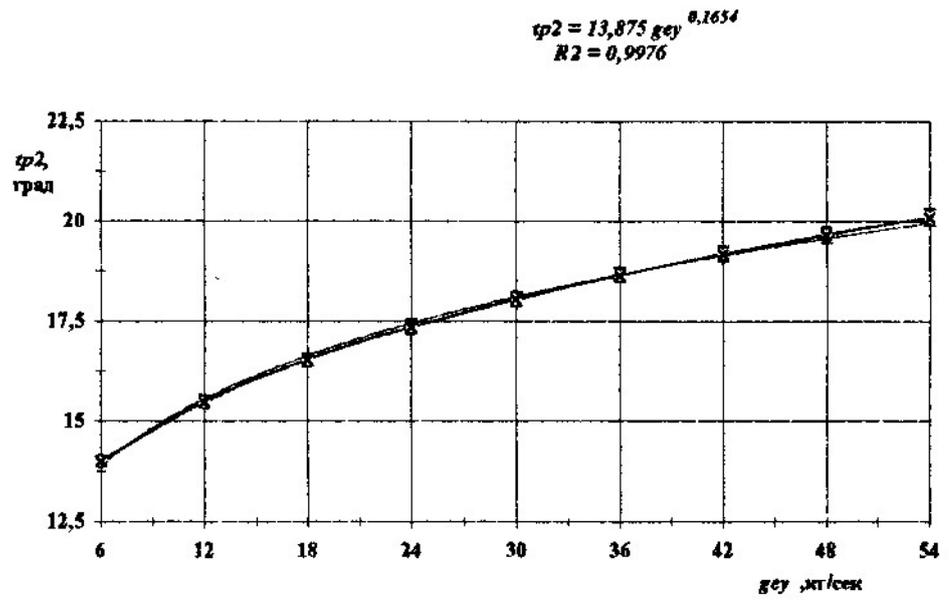


Рис. 1. Оформление графика и уравнений статической характеристики $tp2 = f(gey)$

у _с , % хрв	α _{с2} , град
10	37,12
20	41,08
30	42,92
40	44,82
50	44,77
60	45,31
70	45,74
80	46,07
90	46,35

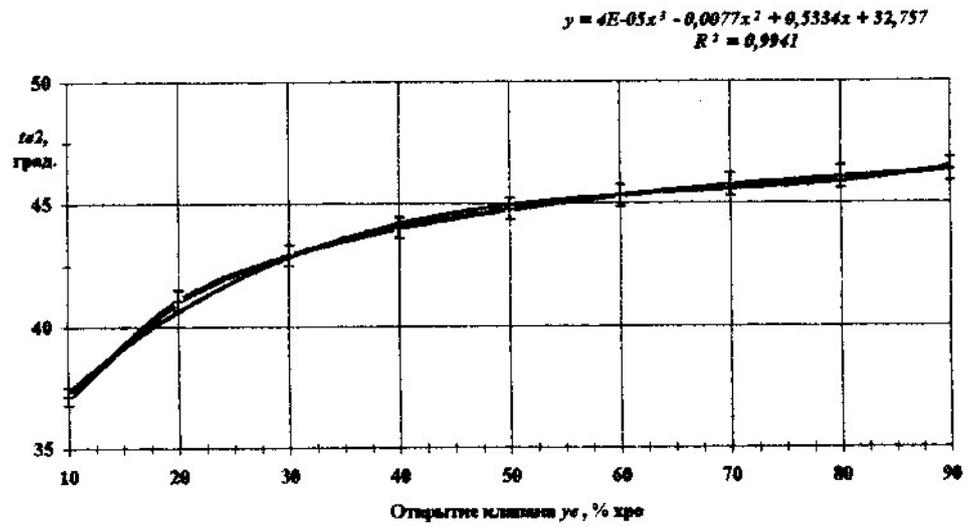


Рис. 2. Оформление графика и уравнений статической характеристики $\alpha_{с2} = f(y_{с})$

$te1$, град	$tp2$, град	$tc2$, град
45	15,03	31,73
50	16,03	36,08
55	17,04	40,42
60	18,04	44,77
65	19,04	49,11
70	20,05	53,46
75	21,05	57,81
80	22,06	62,15

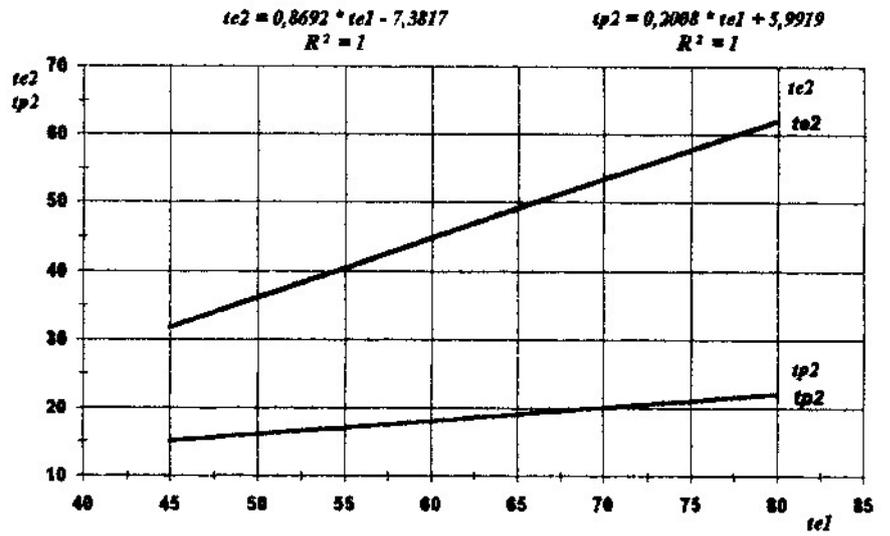


Рис. 3. Оформление графиков и уравнений статических характеристик $tc2 = f(te1)$, $tp2 = f(te1)$

```

dtp2( 0 ) = 0.00 dte2( 0 ) = 0.00
dtp2( 25 ) = 1.17 dte2( 25 ) = 9.42
dtp2( 50 ) = 2.15 dte2( 50 ) = 12.75
dtp2( 75 ) = 2.84 dte2( 75 ) = 15.71
dtp2( 100 ) = 3.29 dte2( 100 ) = 16.60
dtp2( 125 ) = 3.53 dte2( 125 ) = 17.01
dtp2( 150 ) = 3.75 dte2( 150 ) = 17.20
dtp2( 175 ) = 3.86 dte2( 175 ) = 17.30
dtp2( 200 ) = 3.93 dte2( 200 ) = 17.34
dtp2( 225 ) = 3.97 dte2( 225 ) = 17.36
dtp2( 250 ) = 3.99 dte2( 250 ) = 17.37
dtp2( 275 ) = 4.00 dte2( 275 ) = 17.38
dtp2( 300 ) = 4.01 dte2( 300 ) = 17.38
dtp2( 325 ) = 4.01 dte2( 325 ) = 17.38
dtp2( 350 ) = 4.02 dte2( 350 ) = 17.38
dtp2( 375 ) = 4.02 dte2( 375 ) = 17.38
dtp2( 400 ) = 4.02 dte2( 400 ) = 17.38
dtp2( 425 ) = 4.02 dte2( 425 ) = 17.38
dtp2( 450 ) = 4.02 dte2( 450 ) = 17.38
dtp2( 475 ) = 4.02 dte2( 475 ) = 17.38
dtp2( 500 ) = 4.02 dte2( 500 ) = 17.38
dtp2( 525 ) = 4.02 dte2( 525 ) = 17.38
dtp2( 550 ) = 4.02 dte2( 550 ) = 17.38
dtp2( 575 ) = 4.02 dte2( 575 ) = 17.38

```

```

z(t=0) = 19.04
z1(u1) = 44.77
z(N) = 22.06
z1(N) = 62.15

```

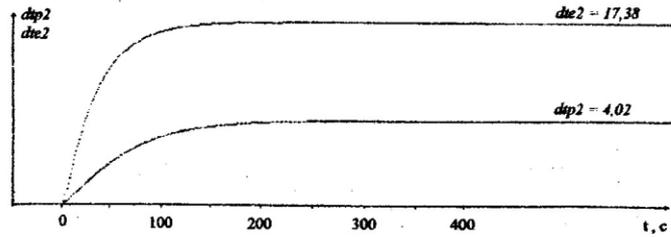


Рис. 4. Переходная характеристика теплообменного аппарата $te_2 = F(te_1, \tau)$. Возмущение $dte_1 = 20$ град.

τ	t		τ	dt
0	0	4,0259	0	0
25	1,17	58,844	1,3935	0,05
50	2,15		2,3047	0,0239
75	2,84		2,9005	0,0037
100	3,29		3,29	1E-09
125	3,58		3,5448	0,0012
150	3,76		3,7113	0,0024
175	3,86		3,8202	0,0016
200	3,93		3,8914	0,0015
225	3,97		3,938	0,001
250	3,99		3,9684	0,0005
275	4		3,9883	0,0001
300	4,01		4,0014	7E-05
325	4,01		4,0099	2E-08
350	4,02		4,0154	2E-05
375	4,02		4,0191	9E-07
400	4,02		4,0214	2E-06
425	4,02		4,023	9E-06
450	4,02		4,024	2E-05
475	4,02		4,0247	2E-05
500	4,02		4,0251	3E-05
525	4,02		4,0254	3E-05
550	4,02		4,0256	3E-05
575	4,02		4,0257	3E-05
			0,0861	

Определение коэффициентов уравнения динамики объекта.

Используется функция "Поиск решения".

Определяется характеристика $tp2 = F(te1, t)$, возмущение $del1 = 20$.

Переходная характеристика аппроксимируется уравнением апериодического звена 1 порядка :

уравнение: $T \frac{dtp2}{dt} + tp2 = k * del1$ переходная функция:

$$T \frac{dtp2}{dt} + tp2 = k * del1 \quad dtp2(t) = k * (1 - e^{-\frac{t}{T}})$$

В таблице результатов в расчёта:

Коэффициент передачи объекта $k = 4,03$ в ячейке C2.

Постоянная времени объекта $T = 58,84$ в ячейке C3

Суммарная среднеквадратическая ошибка $w = 0,086$ в ячейке E26

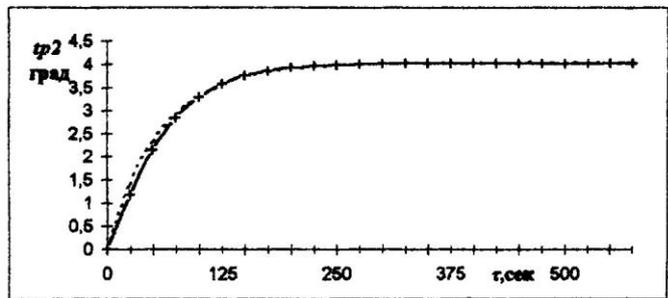


Рис. 5. Обработка переходной характеристики $tp2 = F(te1, \tau)$

τ	t		tr	dt
0	0		0	0
25	0	16,816	0,2639	0,0696
50	0,27	132,61	0,9336	0,4404
75	0,97	132,57	1,862	0,7957
100	1,99		2,9403	0,9031
125	3,25		4,0896	0,705
150	4,69		5,2537	0,3177
175	6,14		6,3935	0,0642
200	7,42		7,483	0,004
225	8,56		8,5058	0,0029
250	9,56		9,4527	0,0115
275	10,45		10,32	0,017
300	11,23		11,106	0,0154
325	11,92		11,814	0,0113
350	12,53		12,447	0,0069
375	13,06		13,01	0,0025
400	13,54		13,509	0,0009
425	13,96		13,949	0,0001
450	14,32		14,335	0,0002
475	14,65		14,673	0,0005
500	14,94		14,968	0,0008
525	15,19		15,225	0,0013
550	15,41		15,449	0,0015
575	15,61		15,642	0,001
600	15,79		15,81	0,0004
625	15,94		15,954	0,0002
			3,3742	

Определение коэффициентов уравнения динамики объекта.

Используется функция "Поиск решения".

Определяется зависимость $tp3 = F(te1)$, возмущение $dte1 = 20$.

Переходная характеристика аппроксимируется уравнением аperiodического звена 2 порядка:

уравнение:

$$T1 * T2 \frac{d^2 dp3}{dt^2} + (T1 + T2) \frac{d dp3}{dt} + dp3 = k * dte1$$

переходная функция:

$$dp3(t) = k \left(1 - \frac{T1}{T1 - T2} * e^{-\frac{t}{T1}} + \frac{T2}{T1 - T2} * e^{-\frac{t}{T2}} \right)$$

В таблице результатов расчёта:

Коэффициент передачи объекта $k = 16,82$ в ячейке C3.

Постоянная времени объекта $T1 = 132,61$ в ячейке C4

Постоянная времени объекта $T2 = 132,57$ в ячейке C5

Суммарная среднеквадратическая ошибка $w = 3,37$ в ячейке E28

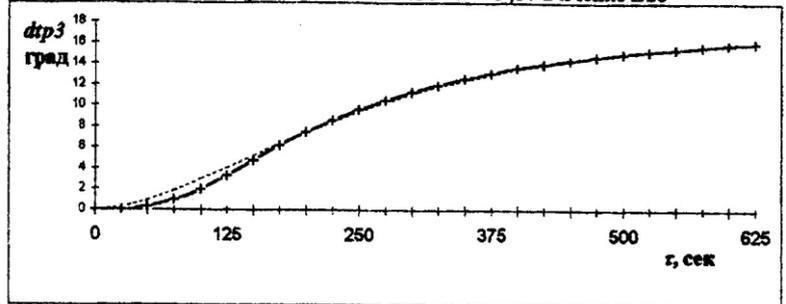


Рис. 6. Обработка переходной характеристики $dp3 = F(te1, \tau)$

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	1
2. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЪЕКТА....	4
2.1. Составление и оформление технологической схемы объекта управления	4
2.2. Разработка и оформление структурно-параметрической схемы объекта. Выбор математического описания звеньев	7
3. РАЗРАБОТКА И ОФОРМЛЕНИЕ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНАЛИЗИРУЕМОГО ОБЪЕКТА	12
4. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ	15
5. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОБЪЕКТА НА ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ.....	17
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 Изучение методики работы с шаблонами, формирующими модель многозвенного объекта управления	20
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 Исследование статических характеристик многозвенного объекта управления	22
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 Исследование динамических характеристик многозвенного объекта управления	23
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	25

Стегаличев Юрий Георгиевич
Замарашкина Вероника Николаевна

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТА МЕТОДОМ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭВМ

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
для студентов всех специальностей

Редактор
Л.Г. Лебедева

Корректор
Н.И. Михайлова

Подписано в печать 27.12.2003. Формат 60×84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,79. Печ. л. 3,00. Уч.-изд. л. 2,88
Тираж 200 экз. Заказ ? С 60

СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9
ИПЦ СПбГУНиПТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9