МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

С.Е. Алёшичев, В.А. Балюбаш,

Ю.Г. Стегаличев

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2016

УДК 664 ББК 32.965 А 38

Алёшичев С.Е., Балюбаш В.А., <u>Стегаличев Ю.Г.</u> Формирование структуры многоканальных объектов управления аппаратурнотехнологических комплексов пищевых производств: Учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 107 с.

Учебное пособие предназначено для изучения алгоритмов, а также методик структурно-параметрического анализа аппаратурно-технологических комплексов многозвенных, многофакторных объектов автоматизированного управления. Рассматриваются и анализируются статические характеристики объектов, а также динамические свойства и их изменения в прогнозируемых производственных ситуациях на технологическом объекте.

Предназначено для магистров, обучающихся по направлению 15.04.04. Автоматизация технологических процессов и производств при изучении дисциплин «Организация и методика экспериментальных исследований», «Интегрированные информационно-управляющие системы контроля качества сырья и пищевых продуктов», «Многоканальные системы управления качеством сырья и пищевых продуктов», «Анализ аппаратурно-технологических комплексов производств пищевых продуктов», «Автоматизация температурно-влажностных режимов хранения сырья и пищевых продуктов» очной и заочной форм обучения, а также рекомендуется в качестве дополнительной литературы для бакалавров, обучающихся по направлению 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств.

Рецензенты: ООО «ИЦ Холодильные технологии» (генеральный директор кандидат техн. наук, доц. В.Б. Данин); доктор техн. наук, проф. А.А. Бегунов (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики)

Рекомендовано к печати Советом факультета пищевых биотехнологий и инженерии, протокол № 10 от 30 июня 2016 г.

#### УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших году статус национального исследовательского университета. в 2009 С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5-100». Цель Университета ИТМО - становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского ПО типу, ориентированного интернационализацию всех направлений на деятельности.

> © Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2016 © Алёшичев С.Е., Балюбаш В.А., Стегаличев Ю.Г., 2016

#### СПИСОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

#### Сокращения

АСУТК – автоматизированная система управления технологическим комплексом.

ПК – персональный компьютер.

САУ – система автоматического управления.

САР – система автоматического регулирования.

ТК – технологический комплекс – сложный многозвенный, многофакторный объект управления, на входе и выходе которого, а также внутри самого объекта при работе оборудования формируется большое количество переменных параметров.

ТО – теплообменный аппарат проточного типа (теплообменник).

ХРО – ход рабочего органа (управляющее воздействие).

QB – компилятор QBasic.

QBasic – среда QBasic (набор программ).

#### Обозначения

Z(i), (i = 1, ..., n) – обобщённое обозначение параметров, формирующихся на выходе технологического комплекса (показатели качества).

z(i), (i = 1, ..., n) – то же на выходе звена в структурной схеме.

 $X(\gamma)$ , ( $\gamma = 1, ..., m$ ) – обобщенное обозначение внешних переменных параметров, поступающих на вход ТК (неуправляемые возмущения).

 $x(\gamma), (\gamma = 1, ..., m)$  – то же на выходе звена в структурной схеме.

Y(j), (j = 1, ..., k) – обобщенное обозначение параметров, изменяемых в Z(i), в процессе управления ТК (управляемые воздействия).

y(j), (j = 1, ..., k) – то же на выходе звена в структурной схеме.

*пот z(i), пот x(*ү*), пот y(j)* – номинальные численные значения показателей качества и возмущений при начальном установившимся (статическом) режиме работы комплекса, принимаемые за начало шкалы отсчёта отклонений переменных.

 $dZ(i), dX(\gamma), dY(j)$  – численные значения положительных и отрицательных отклонений показателей качества и возмущений от номинала.

*min Z(i), min X(\gamma), min Y(j), max Z(i), max X(\gamma), max Y(j) – минимальные и максимальные численные значения показателей качества и возмущений, достижение которых возможно при эксплуатации комплекса.* 

*izm* Z(i), *izm*  $X(\gamma)$ , *izm* Y(j) – измеренное численное значение параметра.

*opt* Z(i), *opt* Y(j) – численные значения показателей качества и управляющих воздействий обеспечивающих режим работы комплекса оптимальный по заданному критерию.

*ust* Z(i), *ust* X(i) – численное значение регулируемого параметра, уставка регулятору, предельно допустимое значение.

#### ВВЕДЕНИЕ

В данном пособии излагается методика и практика подготовки сложного многозвенного (много связанного) и многопараметрового (многомерного) технологического комплекса к созданию комплексной автоматизированной системы управления технологическими комплексами (АСУТК).

В разделах пособия предлагается методика и примеры аппаратурно-технологического анализа для основных классов технологических комплексов, а также использование результатов анализа для реализации модулей АСУТК.

В разделах 1–4 – алгоритм и методика аппаратурнотехнологического анализа комплекса на примере технологического процесса нагрева продукта в проточном теплообменнике.

В связи с малым объёмом аудиторных занятий по изучению профилирующих дисциплин структура пособия предусматривает широкое использование самостоятельной работы студентов. В каждом разделе предлагаются темы для индивидуальной самостоятельной разработки и оформления с использованием специального программного обеспечения, размещённого в приложениях на диске.

Индивидуальные задания предлагаются по тематике направления 15.04.04 Автоматизация технологических процессов пищевых производств.

При использовании пособия для других отраслей целесообразно изменить содержание индивидуальных заданий, не изменяя основного материала.

В объём самостоятельной работы входит также работа в ИН-ТЕРНЕТЕ по изучению дополнительных учебных материалов, предлагаемых по каждой теме. Электронный адрес для вызова дополнительных файлов представлен в списке литературы.

#### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Технологические процессы пищевых производств реализуются с использованием разнообразных аппаратов и механизмов, которые работают под управлением средств автоматизации. При этом могут образовываться замкнутые контурные связи с включением в контур большого числа взаимодействующих механизмов, агрегатов и технических средств автоматизации. С примерами можно ознакомиться по описаниям систем автоматизации производства пищевых продуктов [1], производства мясных и молочных продуктов [2], фруктои овощехранилищ [3].

При разработке комплексных автоматизированных систем управления технологическими комплексами (АСУТК) целесообразно рассматривать технологический комплекс как сложный многозвенный объект управления, на выходе которого формируются заданные свойства продукта, – показатели качества Z(i) (i = 1, ..., n). На вход такого объекта поступают неуправляемые  $X(\gamma)$  ( $\gamma = 1, ..., m$ ) и управляемые Y(j) (j = 1, ..., k) возмущения.

При создании системы автоматизированного управления технологическим комплексом необходимы результаты анализа параметров, характеризующих работу объекта управления в установившихся режимах (статика) и в процессе перехода с одного режима на другой при изменении возмущений или производственной ситуации на объекте (динамика).

Таким образом, возникает необходимость проведения анализа статических и динамических характеристик сложного многозвенного и многофакторного объекта.

Исследование технологического комплекса как объекта управления можно провести по методике **структурно-параметрического** анализа технологической схемы комплекса [4].

Основные этапы анализа свойств Технологического комплекса [5]

1. Формирование структурной схемы технологического комплекса с выделением звеньев, действие которых можно описать

достаточно простыми математическими функциями, с обозначением на схеме структуры взаимодействия этих звеньев.

Звенья, образующие технологический комплекс, могут взаимодействовать между собой по последовательной, параллельной, встречно-параллельной или комбинированной схемам [6].

В номенклатуру звеньев могут входить звенья различной физической природы, с различными инерционными свойствами, безынерционные, функциональные, а также звенья, реализующие логические функции.

Одновременно с формированием структурной схемы проводится **параметрический анализ** технологического комплекса. Для каждого звена определяют выходные переменные параметры z(i), где i = 1, ..., n, которые формируются в данном звене, а также внешние, по отношению к данному звену, воздействия: возмущающие  $x(\gamma)$ , где  $\gamma = 1, ..., m$  и управляющие y(j), где j = 1, ..., k.

2. На следующем этапе анализа технологического комплекса выполняется анализ производственных ситуаций на объекте управления. При этом выявляются возможные изменения режимов работы технологического оборудования и необходимые перестройки по ходу технологического процесса. Результат такого анализа – получение номинальных численных значений *nom* z(i), *nom*  $x(\gamma)$ , *nom* y(j) и диапазонов варьирования *min* Z(i) < z(i) < max Z(i), *min*  $X(\gamma) < x(\gamma) < max X(\gamma)$ , *min* Y(j) < y(j) < max Y(j) всех выходных и входных переменных (информационное обеспечение для анализа производственных ситуаций).

3. С использованием результатов предыдущих этапов анализа технологического комплекса формируется математическое обеспечение необходимое для исследования характеристик комплекса (математическая модель объекта управления) [7]. Для каждого звена выделенного в структурной схеме выбирается его математическое описание, т.е. зависимость параметров, формирующихся на выходе звена (z(i), где i = 1, ..., n) от входных переменных ( $x(\gamma)$ , где  $\gamma = 1, ..., m$  и y(j), где j = 1, ..., k).

Математическое описание звеньев оформляется в виде:

– алгебраических зависимостей для безынерционных звеньев, т.е. звеньев, не содержащих аккумуляторов;

– дифференциальных уравнений для инерционных звеньев;

– логических функций для звеньев, формирующих условие перехода в соответствии с алгоритмом управления объектом.

При структурно-параметрическом исследовании технологических комплексов могут использоваться различные методы формирования модели:

– <u>аналоговые модели</u> – математические описания, полученные при использовании уравнений математической физики (энергообмен, массообмен, изменение агрегатного состояния веществ и т.п.) [8];

– <u>экспериментальные модели</u> – математические описания, полученные при проведении активного эксперимента на объекте (звене в структуре объекта) [9];

 – регрессионные модели – математические описания, полученные при проведении пассивного эксперимента на объекте (технологическом комплексе) и обработки результатов по методикам множественного регрессионного анализа [5];

– <u>экспертные модели</u> – математическое описание изменения отдельных показателей качества, полученное при проведении экспертного исследования или анкетирования и обработки результатов с использованием методов математической статистики [4].

Из математических описаний отдельных звеньев структурной схемы формируется система уравнений – математическая модель объекта управления (технологического комплекса). Модель в обязательном порядке дополняется системой ограничений на диапазон варьирования переменных из таблиц информационного обеспечения.

4. Совместным решением системы уравнений модели комплекса, с учётом ограничений на диапазон варьирования переменных, определяют статические характеристики технологического комплекса  $(Z(i) = f_{i,\gamma}(X(\gamma)), Z(i) = f_{i,j}(Y(j)), где i = 1, ..., n, \gamma = 1, ..., m$ и j = 1, ..., k) как возможные совокупности равновесных статических состояний. Это такие сочетания численных значений переменных, при которых все входные  $(X(\gamma) u Y(j))$  и выходные (Z(i)) переменные технологического комплекса постоянны во времени. Поиск начинают от **номинального статического состояния** при значении переменных Z(i) = nom z(i), определяемых технологическими требованиями и занесенными в таблицу информационного обеспечения.

5. Исследование динамических характеристик (свойств) технологического комплекса как единого объекта управления проводится по графикам переходных характеристик, полученных при решении

системы уравнений математической модели объекта управления (технологического комплекса) при изменении на входе комплекса любого из возмущений.

#### Использование результатов

Результаты комплексных исследований статических и динамических свойств сложных многозвенных и многофакторных технологических комплексов как единого объекта управления позволяют провести оценку:

 управляемости технологического комплекса при изменении производственных ситуаций, возникающих на объекте управления;

– целесообразности организации управления технологическим комплексом «по отклонению» либо «по возмущению»;

 выбора закона регулирования и оптимальности настойки регуляторов;

 целесообразности организации программного или поискового оптимального по заданному критерию управления, режима работы оборудования технологического комплекса путем выбора сочетания двух или более управляющих воздействий.

Исследования такого объема возможны только при максимальном использовании вычислительной техники и прикладного математического программного обеспечения компьютеров.

Реализация процедуры исследования свойств многофакторного, многозвенного объекта приводится в разделах 2 и 3 данного пособия на не сложном примере анализа свойств проточного теплообменного аппарата (TO) [4]. В приложениях к разделам 2 и 3 предлагаются программные шаблоны для проведения лабораторных и практических работ на компьютере при изучении методов структурнопараметрического анализа.

В разделах 2 и 3 пособия на примере теплообменника рассматривается порядок анализа условий эксплуатации объекта (производственных ситуаций) и разработки математического и программного обеспечения, предназначенного для имитации переходных процессов в сложном многозвенном объекте управления при появлении внешних возмущающих воздействий. Разработка модели осуществляется на основе структурно-параметрического анализа объекта, декомпозиции сложного объекта на элементарные звенья и составления математического 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 с применением персонального компьютера (ПК) в программной среде *Word, Excel, QBasic*. Материал пособия обеспечивает возможность проведения исследований статических и динамических свойств по переходной кривой многозвенного объекта управления при скачкообразном изменении возмущения. Алгоритм исследования излагается в виде цикла лабораторных работ.

Все этапы разработки оформлены в виде программных файлов для ПК, размещены в приложениях 1–9, их используют при анализе объекта и оформлении результатов работы по индивидуальному заданию.

В объем лабораторных работ входят:

1. Ознакомление по разделу 2.1 и прил. 1 [http://de.ifmo.ru/-books/appendix\_1-10.zip] с методикой составления и оформления технологической схемы объекта управления, ее описания, выбор обозначений и размерности всех переменных и констант. Корректировка и компьютерное оформление технологической схемы в соответствии с индивидуальным заданием.

2. Ознакомление по разделу 2.2 и прил. 1 [http://de.ifmo.ru/-books/appendix\_1-10.zip] с методикой разработки и оформления структурно-параметрической схемы объекта. Корректировка и компьютерное оформление структурно-параметрической схемы в соответствии с индивидуальным заданием.

3. Ознакомление по разделу 2.2 и прил. 1 [http://de.ifmo.ru/-books/appendix\_1-10.zip] с методикой разработки и оформления системы уравнений, реализующих статические и динамические свойства каждого звена, входящего в структурно-параметрическую схему. Корректировка и компьютерное оформление системы уравнений в соответствии с индивидуальным заданием.

4. Ознакомление по разделу 2.3 и прил. 1 [http://de.ifmo.ru/-books/appendix\_1-10.zip] с методикой анализа производственных ситуаций на объекте и оформления результатов анализа в виде таблиц информационного обеспечения. Корректировка и компьютерное оформление таблиц информационного обеспечения в соответствии с индивидуальным заданием.

5. Ознакомление по разделу 3.1 и прил. 1 [http://de.ifmo.ru/-books/appendix\_1-10.zip] с методикой разработки и оформления программы для расчета переходных характеристик анализируемого объекта как реакции на ввод возмущающих воздействий заданной амплитуды по различным каналам.

6. Ознакомление по разделу 3.2. и приложениям 1 и 2 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip] с методикой работы по исследованию характеристик объекта с использованием расчетной программы MODTO.

7. Исследование статических характеристик объекта управления на аналоговой модели. Оформление результатов исследования в виде графиков и математических описаний для каналов возмущения и управления по индивидуальному заданию. Определение диапазона «управляемости» объекта.

8. Исследование динамических характеристик объекта по методике раздела 3.3, прил. 2 и 3 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip]. Исследование проводится при возмущающих и управляющих воздействиях в соответствии с индивидуальным заданием. Оформление результатов исследования – в виде переходных характеристик, дифференциальных уравнений и передаточных функций. Сравнительный анализ динамических характеристик по результатам исследования вариантов объекта по шаблону и по индивидуальному заданию.

В последующих разделах пособия на примерах различных технологических комплексов пищевых производств излагаются методы и практические приёмы использования структурно-параметрического анализа при создании различных типов систем автоматизации технологических комплексов. В приложениях предлагаются программные шаблоны для проведения лабораторных и практических занятий при изучении этих методик.

В разделах 4–8 пособия приведены примеры использования результатов структурно-параметрического анализа характеристик технологических комплексов с целью создания элементов АСУТК:

 – для разработки статистических моделей комплекса с использованием результатов пассивного эксперимента;  – для разработки рейтинговых моделей комплекса с использованием результатов экспертиз или анкетирования;

 – для исследования замкнутого контура системы автоматического регулирования САР многофакторных и многозвенных объектов при различных изменениях производственных ситуаций на объекте.
 Выбор по результатам исследования закона регулирования и параметров, настройки регулятора на заданный показатель качества;

 – для реализации систем многоканального управления технологическим комплексом с использованием заданного критерия оптимизации;

 – для реализации систем управления многоканальным технологическим комплексом с использованием метода программной оптимизации;

– для реализации автоматизированных рабочих мест (APM) управления технологическим комплексом.

 – для реализации автоматизированных систем статистического контроля изменения состояния технологического комплекса (мониторинг) по измерению заданного показателя качества и организации статистического регулирования качества.

– для формирования программно-логических модулей АСУТК, обеспечивающих привязку всех операций по управлению объектом к реальному времени производственного цикла.

#### 2. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ (ТО)

### 2.1. Составление и оформление технологической схемы объекта управления

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

 основные переменные параметры (отклики), формируемые при реализации технологической операции на выходе объекта;

 возмущающие и управляющие внешние воздействия, действующие на объект, – переменные, изменения которых выводят 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 и прил. 1. представлена технологическая схема прямоточного 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):

-tp2 – температура продукта на выходе, °С;

- *te*2 – температура энергоносителя на выходе, °С.

Для анализа управляемости объекта необходимо также исследовать выходные переменные:

- gey – расход энергоносителя через TO, кг/с;

- *gpy* – расход продукта (производительность TO), кг/с.

Исследование реакции этих переменных на возмущения и является предметом исследования в данных лабораторных работах. Рассмотрим, какие возмущения действуют на анализируемый объект.



Рис. 1. Технологическая схема прямоточного теплообменника (файл *TEXCXTO*):

 $te1 \pm dte1$  – температура энергоносителя на входе с возможными отклонениями, °C;  $tp1 \pm dtp1$  – температура продукта на входе с возможными отклонениями, °C; tp2 – температура продукта на выходе, °C;

te2 – температура энергоносителя на выходе, °C;

ge ± dge – количество энергоносителя, поступающего из магистрали подачи энергоносителя с возможными отклонениями, кг/с;

 $gp \pm dgp$  — количество продукта, поступающего из промежуточного накопителя с возможными отклонениями, кг/с;

 $ye \pm dye$  — команда на закрытие клапана подачи энергоносителя с возможными отклонениями, %ХРО;

 $yp \pm dyp$  – команда на закрытие клапана подачи продукта с возможными отклонениями, %ХРО;

gey – расход энергоносителя через TO, кг/с;

*gpy* – производительность TO, кг/с;

- vp объем продукта, находящегося в TO, м<sup>3</sup>;
- cp удельная теплоемкость продукта, кДж/(кг·°С);
- pp плотность продукта, кг/м<sup>3</sup>;
- *ve* объем энергоносителя, находящегося в TO, м<sup>3</sup>;
- ce удельная теплоемкость энергоносителя, кДж/(кг·°С);
- pe плотность энергоносителя, кг/м<sup>3</sup>;
- fe площадь поверхности теплообмена энергоносителя,  $M^2$ ;
- ue коэффициент теплопередачи энергоносителя, кДж/(с·м<sup>2</sup>·°C);
- fp площадь поверхности теплообмена продукта, м<sup>2</sup>;

up – коэффициент теплопередачи продукта, кДж/(с·м<sup>2</sup>·°С).

Максимальное количество энергоносителя, которое может обеспечить магистраль (*ge*), 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. При этом необходимо определить (в лабораторной работе задать) возможный диапазон отклонений параметра  $\pm dge$ , кг/с. По каналу подачи энергоносителя может поступать также возмущение в виде изменения температуры энергоносителя в магистрали  $\pm dte1$ , °C.

Канал подачи энергоносителя через ТО должен рассматриваться как возможный элемент управляющего воздействия на объект gey, кг/с. Управление расходом энергоносителя через ТО осуществляется внешней командой на изменение положения регулирующего клапана ye  $\pm$  dye, %XPO.

Аналогичным образом определяются возможные возмущающие и управляющие воздействия по каналу расхода продукта через ТО:

 $-gp \pm dgp$  – количество продукта, поступающего из промежуточного накопителя с возможными отклонениями, кг/с;

 $-tp1 \pm dtp1$  – температура продукта на входе в ТО с возможными отклонениями, °С;

- *ур* ± *dур* - команда на изменение положения клапана при управлении по каналу подачи продукта в ТО, %ХРО.

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

- *pp*, *pe* – плотности продукта и энергоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

- *ср*, *се* – удельные теплоемкости продукта и энергоносителя, кДж/(кг·°С);

-up, ue - коэффициенты теплопередачи продукта и энергоносителя, кДж/(с ·м<sup>2</sup>·°C);

*– fp, fe –* площадь поверхности теплопередачи продукта и энергоносителя, м<sup>2</sup>;

-vp, ve – объемы, занимаемые в ТО продуктом и энергоносителем,  $M^3$ .

Представленная на рис.1 технологическая схема оформлена в виде файла – программного шаблона *TEXCXTO* в среде *Microsoft*  Word с использованием графического редактора MS Word Picture. Программный шаблон *TEXCXTO* размещен в прил. 1 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip]. 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 *TEXCXTO* под другим именем, например, добавив к имени числовой индекс;

– переработать схему в соответствии с заданием, используя вновь образованный файл как шаблон.

Изменения схемы осуществляют с помощью команд редактора *MS Word Picture*.

#### 2.2. Разработка и оформление структурнопараметрической 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 приведен пример оформления структурнопараметрической схемы, которая составлена по технологической схеме, представленной на рис. 1, для дальнейшего анализа ТО.

На рис. 2 представлены основные звенья преобразования информации: сумматоры, безинерционные и функциональные инерционные звенья, логические операции, а также информационные потоки на входе и выходе каждого звена. В структурно-параметрической схеме кроме переменных, обозначенных на технологической схеме рис. 1, введены промежуточные переменные, формируемые внутренними звеньями структуры:

qe1 – количество энергии, вносимой в ТО с энергоносителем, кДж/с;

*qe*2 – количество энергии, уходящей из ТО с энергоносителем, кДж/с; *qve* – количество энергии, аккумулированной в объеме энергоносителя, кДж;

*qp*1 – 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;

*qf*1 – количество энергии, переходящей через поверхность ТО на входе в ТО, кДж/с;

*qf*2 – количество энергии, переходящей через поверхность ТО на выходе из ТО, кДж/с;

*kf* – теплопоток через поверхность TO,  $\kappa Д ж/(c \cdot {}^{\circ}C)$ ;

*δqe* – количество энергии, отдаваемой энергоносителем, кДж/с;

*δqp* – количество энергии, переходящей в продукт, кДж/с;

*qf* – количество энергии, передаваемой через поверхность, кДж/с.



Рис. 2. Структурно-параметрическая схема прямоточного теплообменника (файл *CTPCXTO*): *1–12* – звенья технологичекого процесса

На схеме обозначены:

– направление преобразования информации;
 *уе* – внешнее возмущающее или управляющее воздействие;
 *уе* – переменные, формируемые в ТО;
 – сумматор;
 *qe*1 – безынерционное звено;
 *qvp* – инерционное звено

Представленная на рис. 2 структурно-параметрическая схема оформлена в виде файла – программного шаблона *CTPCXTO* в среде *Microsoft Word* с использованием графического редактора *MS Word Picture*. Программный шаблон *CTPCXTO* размещен в прил. 1 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*], и при работе по индивидуальному заданию этот файл используется в качестве шаблона так же, как и файл *TEXCXTO*.

Для исследования характеристик технологического комплекса ТО как единого объекта формируется модель в виде системы уравнений, определяющих взаимосвязь входных и выходных переменных для каждого звена структурно-параметрической схемы. В рассматриваемом примере для ТО (рис. 2) используется метод аналитического описания взаимодействия входных и выходных переменных каждого звена в виде алгебраических или дифференциальных уравнений, например, тепло- и массообмена.

При выборе вида математических описаний отдельных звеньев (уравнений тепло- и массообменная) учитывалось, что эксплуатация объекта осуществляется при относительно небольшом диапазоне варьирования возмущений, что позволяет использовать некоторые упрощения в классических описаниях [10].

Для исследования ТО на схеме (рис. 2) 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 – количества энергоносителя, поступающего из магистрали с возможными отклонениями  $ge \pm dge$ , так и командой на изменение управляющего воздействия – положения клапана при управлении подачей энергоносителя  $ye \pm dye$ . Уравнение звена:

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

**Звено 2.** Аналогично звену 1 формирует значение расхода продукта *gpy*, кг/с, через ТО. Уравнение звена:

$$gpy = (gp + dgp)(1 - 0,01(yp + dyp)).$$
 (2)

Звено 3. Формирует значение промежуточной переменной *qe*1, кДж/с, – количество энергии, поступающей в ТО с энергоносителем за секунду. Уравнение звена:

$$qel = ce \cdot gey(tel + dtel). \tag{3}$$

**Звено 4**. Формирует количество энергии *qe*2, кДж/с, которую уносит уходящий из ТО энергоноситель за секунду. Уравнение звена:

$$qe2 = ce \cdot gey \cdot te2 \,. \tag{4}$$

**Звено 5**. Формирует количество энергии *qp*1, кДж/с, поступающей в ТО с продуктом за секунду. Уравнение звена:

$$qp1 = cp \cdot gpy(tp1 + dtp1).$$
(5)

**Звено 6**. Формирует количество энергии *qp*2, кДж/с, которая уносится с уходящим из ТО продуктом за секунду. Уравнение звена:

$$qp2 = cp \cdot gpy \cdot tp2. \tag{6}$$

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. Расходы энергоносителя *gey* 

и продукта *gpy* могут изменяться в широких пределах, так как являются управляемыми воздействиями на объект. Энергосъём с поверхности теплообмена существенно зависит от скорости движения среды (расхода), и зависимость эта является нелинейной.

Звено 7. Формирует изменение величины теплопотока от энергоносителя 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 *ue*1, кДж/(с·м<sup>2</sup>·°C) при изменении расхода энергоносителя через ТО:

$$ue1 = ue\left(\frac{gey}{ge}\right)^a,\tag{7}$$

где ue – численное значение коэффициента теплопередачи при расходе энергоносителя через TO, равном номинальному расходу из магистрали  $gey = ge_{nom}$  (регулирующий клапан полностью открыт).

Второе уравнение реализует изменение коэффициента теплопередачи от стенки к продукту *up*1 (кДж/с·м<sup>2</sup>.°С) при изменении расхода продукта через ТО:

$$up1 = up\left(\frac{gpy}{gp}\right)^b,\tag{8}$$

где up – численное значение коэффициента теплопередачи при расходе продукта, равном номинальному расходу из накопителя  $gpy = gp_{nom}$  (регулирующий клапан полностью открыт).

Численные значения коэффициентов *a* и *b* в уравнениях (7) и (8) формируют нелинейную зависимость изменения теплопередачи от изменения расходов продукта и энергоносителя и определяются конструктивными и теплотехническими характеристиками конкретного TO.

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

$$kf = \frac{1}{\frac{1}{ue1 \cdot fe} + \frac{1}{up1 \cdot fp}}.$$
(9)

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

$$qf1 = kf[(te1 + dte1) - (tp1 + dtp1)].$$
(10)

**Звено 9.** Формирует количество энергии, переходящей от энергоносителя к продукту через поверхность теплообмена на выходе из ТО за секунду qf2, кДж/с:

$$qf 2 = kf(te2 - tp2). \tag{11}$$

**Звено 10**. Формирует осредненное количество энергии, передаваемой через всю поверхность теплообмена за секунду *qf*, кДж/с:

$$qf = 0,5(qf1 + qf2).$$
(12)

Звено 11. Формирует численное значение температуры энергоносителя на каждом шаге интегрирования с учётом инерционных свойств объема энергоносителя *ve*, находящегося в ТО. В звене формируется приращение температуры уходящего энергоносителя *dte*2, °C во времени при нарушении теплового баланса (*qe*1-*qe*2≠*qf*), т. е. если количество энергии, отданной энергоносителем, отличается от количества энергии, переданной через поверхность теплообмена.

При нарушении теплового баланса скорость изменения приращения температуры *dte*2 определяет уравнение интегрирующего звена

$$\left(ce \cdot pe \cdot ve\right) \frac{ddte2}{d\tau} = qe1 - qe2 - qf.$$
(13)

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

$$dte2(i) = \frac{(qe1 - qe2 - qf)}{ce \cdot pe \cdot ve} d\tau.$$
(14)

При восстановлении баланса (qe1 - qe2 = qf), приращение dte2 = 0.

В математическом описании динамических свойств звена 11 предусмотрена логическая операция – ограничение на случай, если температура энергоносителя становится равной либо меньше температуры продукта на выходе из ТО  $te2 \leq tp2$ . В этом случае приращение dte2(i) принимается равным нулю и интегрирование приостанавливается.

Численное значение температуры энергоносителя на выходе звена на *i*-м шаге интегрирования определяется уравнением:

$$te2(i) = te2(i - d\tau) + dte2(d\tau).$$
(15)

Математическая запись операции, реализуемой звеном 11 в системе уравнений модели объекта, имеет вид:

$$IF \ te2-tp2 > 0$$

$$THEN \ dte2(i) = (qe1-qe2-qf) \cdot d\tau / (ce \cdot pe \cdot ve)$$

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

$$te2 = te2 + dte2(i).$$
(16)

Звено 12. Формирует численные значения температуры продукта на каждом шаге интегрирования с учётом инерционных свойств объема продукта *vp*, находящегося в ТО. По аналогии со звеном 11 математическая запись операций, реализуемых звеном 12, имеет вид:

$$IF \ te2-tp2 > 0$$

$$THEN \ dtp2(i) = (qp2-qp1-qf)d\tau / (cp \cdot pp \cdot vp)$$

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

$$tp2 = tp2 + dtp2(i).$$
(17)

Численное значение температуры продукта на выходе звена на *i*-м шаге интегрирования определяется уравнением:

$$tp2(i) = tp2(i - d\tau) + dtp2(d\tau).$$
(18)

При восстановлении баланса (qp2 - qp1 = qf) приращение dtp2 = 0.

Уравнения, реализуемые звеньями структурнопараметрической схемы (рис. 2) и комментарии к ним оформлены в файл-шаблон *УРАВТО* с использованием текстового редактора *Word*. При оформлении сложных формул, например, для звена 7, использован редактор формул *Microsoft EquatioN* 3.0. Шаблон *УРАВТО* размещен в прил. 1 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*].

При оформлении разработанных по индивидуальному заданию структурно-параметрической схемы и системы уравнений звеньев схемы файлы *CTPCXTO* и *VPABTO* используются совместно как шаблоны.

#### 2.3. Анализ производственных ситуаций на объекте Оформление результатов анализа в таблицах информационного обеспечения

Анализ производственных ситуаций на объекте управления производится с целью установления численных значений всех переменных и констант, входящих в систему уравнений модели объекта (1)-(18). Анализируя технологическую схему и требования к качественным характеристикам продукта, Z(i), формируемым на выходе технологического комплекса, определяют допускаемые по технологии номинальные значения *nom* z(i) и допустимый диапазон варьирования *min*  $Z(i) \div max$  Z(i).

Результаты анализа оформляются в виде таблиц информационного обеспечения. В прил. 1 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip] приведена рекомендуемая форма и содержание таких таблиц. Файл приложения ИНФТО [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip] оформлен с использованием редактора таблиц в среде Microsoft Word.

Анализируя технологические и конструктивные характеристики оборудования объекта, определяют **номинальные численные значения** переменных *nom*  $x(\gamma)$ , ( $\gamma = 1, ..., m$ ) и *nom* y(j), (j = 1, ..., k), варьируемых в процессе эксплуатации и управления объектом.

Изменения производственных ситуаций и условий эксплуатации технологического комплекса определяют по диапазонам варьирования возмущающих *min*  $X(\gamma) \div max X(\gamma)$  и управляющих *min*  $Y(j) \div max Y(j)$  воздействий на объект.

Обязательным условием выбора номинальных численных значений варьируемых переменных является обеспечение начального равновесного состояния объекта, при котором объект находится в состоянии статического равновесия и обеспечивается формирование выходных переменных Z(i) = nom z(i).

На рис. 3 приведен пример таблиц информационного обеспечения, составленных по форме шаблона ИНФТО и заполненных по результатам анализа производственных ситуаций для ТО.

В табл. 1 на рис. 3 внесены требования к качественным характеристикам параметров, формируемых на выходе технологического комплекса при номинальном режиме и в переходных режимах.

В рассматриваемом примере ТО основной задачей системы автоматического управления (САУ) является стабилизация температуры продукта на выходе *tp*2 при любых возможных производственных ситуациях на объекте.

Для температуры продукта на выходе tp2 необходимо установить номинальное численное значение параметра *nom* tp2, °C, которое поддерживается в начальном равновесном статическом состоянии объекта. Это значение при настройке САУ используется как уставка (задание) регулятору. Анализируя технологические требования к выходной переменной tp2, необходимо установить и записать в табл. 1 приложения информационного обеспечения [*http://de.ifmo.ru/-books/appendix\_1-10.zip*] допустимые максимальное и минимальное значения регулируемого параметра в других равновесных состояниях объекта. Эти значения необходимы, например, для задания допустимой статической ошибки при работе САУ.

Необходимо также определить требования к изменению регулируемого параметра при работе САУ в переходном процессе (в динамике). Эти требования в сочетании с исследованными статическими и динамическими характеристиками объекта обеспечивают выбор типа регулятора и параметров его настройки по одной из методик [11].

Анализируя технологические требования к изменениям *tp*2 в переходном процессе (динамике) необходимо установить:

– допустимую амплитуду  $\delta tp2$  и продолжительность  $\delta \tau$  кратковременного отклонения регулируемого параметра в переходном процессе за пределы зоны статического равновесия (динамический заброс);

 предельное значение продолжительности перехода на новый установившийся режим регулируемого параметра при устранении регулятором влияния возмущения (время регулирования) – тр, с;

 целесообразность формирования регулятором колебательного переходного процесса в контуре САУ объекта, а также требований к параметрам колебательного переходного процесса, например:

a) 
$$\xi = \left| \frac{A2}{A1} \right| \cdot 100$$
 – интенсивность затухания колебаний, %,

где A1 и A2 – амплитуда первой и второй полуволны колебательного процесса соответственно,

б)  $\sum_{i=1}^{N} (\delta t p 2(i))^{2}$ ,  $\int_{0}^{\tau p} \delta t p 2 d\tau$  – минимальная суммарная

квадратичная или интегральная ошибка, соответственно.

в)  $1/\tau k$  – предельно допустимая частота колебаний, с<sup>-1</sup>, где  $\tau k$  – время цикла установившихся автоколебаний.

В качестве примера в табл. 1 на рис. 3 внесены требования к качественным характеристикам контура стабилизации температуры продукта *tp*2 при эксплуатации САУ для ТО. В качестве критерия оптимизации переходных характеристик САР выбран критерий минимальной суммарной квадратичной ошибки.

При анализе параметров TO (рис. 1) определена выходная переменная – температура энергоносителя на выходе te2. Номинальное численное значение *nom te2* и диапазон варьирования *min te2* и *max* te2 этой переменной зависят от конструктивных и теплотехнических характеристик TO и определяются по энергетическому балансу при исследовании статических характеристик TO.

На выходе ТО формируются также переменные gey – расход энергоносителя через ТО, кг/с и gpy – расход продукта через ТО, кг/с. Требования к номинальному значению *nom gpy* (производительность ТО) и допустимому диапазону варьирования  $\pm dgpy$  определяются при анализе нормативных требований по эксплуатации ТО. Нормативные значения *nom gey* и ожидаемый диапазон варьирования  $\pm dgey$  зависят от конструктивных и технологических характеристик ТО на момент исследования объекта и определяются по энергетическому балансу.

В рассматриваемом примере назначенное по результатам анализа ТО номинальное значение регулируемого параметра *nom tp*2 определяет выбор номинальных значений всех возмущающих (nom gp, nom tp1, nom ge, nom te1) и управляющих (nom yp, nom ye) воздействий, а также номинальное значение других параметров, формируемых на выходе объекта (nom te2), входящих в уравнение модели технологического комплекса.

Система уравнений модели объекта (1)–(18) определяет взаимосвязь основных переменных в равновесных (статических) состояниях ТО при различных сочетаниях возмущающих и управляющих воздействий. Диапазон варьирования переменных определяется при анализе изменения производственных ситуаций на объекте.

Начальное равновесное состояние объекта проверяется подстановкой в систему уравнений номинальных численных значений всех переменных.

Для исследования статических характеристик технологического комплекса необходимо, анализируя технологические и конструктивные характеристики объекта, определить и занести в табл. 2 шаблона ИНФТО номинальные численные значения и возможный диапазон варьирования всех переменных параметров, а также константы, входящие в модель объекта.

В табл. 2 на рис. 3 внесены:

*ср* и *се* – удельные теплоемкости продукта и энергоносителя, кДж/(кг· °С);

*pp* и *pe* – плотности продукта и энергоносителя, кг/м<sup>3</sup>;

*vp* и *ve* – объемы, занимаемые в ТО продуктом и энергоносителем, м<sup>3</sup>;

*fp* и *fe* – площади поверхности теплообмена в ТО продукта и энергоносителя, м<sup>2</sup>;

*ир* и *ие* – коэффициенты теплопередачи от поверхности теплообмена к продукту и от энергоносителя к поверхности теплообмена при максимальном расходе среды через ТО, кДж/(с·м<sup>2.0</sup>С);

*а* и *b* – безразмерные коэффициенты влияния скорости, соответственно, энергоносителя и продукта на интенсивность теплопередачи.

В рассматриваемом примере основной технологической задачей является получение на выходе заданного количества продукта (*gpy*, кг/с) при заданной (стабилизированной) температуре (*tp*2, °C). Поэтому анализ начинают с определения характеристик канала подачи продукта.

По конструктивным и технологическим характеристикам TO определяют номинальную пропускную способность (производительность) аппарата по продукту *nom gpy*, кг/с. Если предусматривается использование канала подачи продукта для управления режимами работы объекта, то на входе в TO устанавливается регулируемый клапан подачи продукта из промежуточного накопителя. Проходное сечение клапана выбирается из условия – обеспечить номинальную производительность TO (*nom gpy*) при 50 %-м закрытии клапана *nom yp* = 50 % ХРО. При линейной характеристике клапана в диапазоне варьирования управляющего воздействия *min Yp* = 10% ХРО и *max Yp* = 90 % ХРО обеспечивается изменение расхода продукта через TO *max gpy* = 1,4*·nom gpy* и *min gpy* = 0,4*·nom gpy*.

Принятый диапазон варьирования расхода продукта через ТО определяет номинальное значение возмущения – подачи продукта из промежуточного накопителя nom  $gp = nom 2 \cdot gpy$ , кг/с. Анализируя условия работы промежуточного накопителя продукта, определяют возможный диапазон варьирования возмущений по этому каналу из магистрали продукта колебания подачи подвода В TO min gp...max gp и диапазон возможных изменений температуры на входе в TO min tp1...max tp1. Из условий нормального статистичераспределения назначают ского номинальное значение  $nom tp1 = 0,5 \cdot (max tp1 + min tp1)$ . Выбранные численные значения заносят в таблицу 3 информационного обеспечения (табл. 3 на рис. 3).

Анализируя условия работы магистрали подачи энергоносителя в TO, определяют возможный диапазон варьирования возмущающего воздействия – температуры энергоносителя на входе в TO *min te1...max te1*. Исходя из предположения нормального распределения, можно назначить номинальное значение *nom te1* =  $0.5 \cdot (max te1 + min te1)$ , °C.

Номинальное численное значение расхода энергоносителя через ТО (*nom gey*, кг/с) определяется по условию энергетического баланса qe1 - qe2 = qp1 - qp2 (см. (1)...(18)) при номинальных значениях всех выбранных ранее констант входных и выходных переменных

$$ce \cdot gey \cdot (nom \ te1 - nom \ te2) = cp \cdot nom \ gpy \cdot (nom \ tp2 - nom \ tp1).$$
 (19)

Такая проверка начального равновесного состояния предусмотрена также на стадии исследования статических характеристик объекта.

Выбранное численные значения *nom gey* определяет номинальное значение расхода энергоносителя из магистрали подачи в TO (*ge*, кг/c). С учетом величины открытия регулирующего клапана в начальном равновесном состоянии (*nom ye* = 50 % XPO) необходимо выбрать *nom ge* =  $2 \cdot nom$  gey, кг/с и проверить входит ли это значение в диапазон возможных отклонений возмущения *min ge* ...*max ge*, кг/с.

Все выбранные при анализе объекта номинальные численные значения переменных и диапазоны их варьирования записывают в табл. 3 на рис. 3.

При оформлении разработанных по индивидуальному заданию таблиц информационного обеспечения файл ИНФТО используется как шаблон.

Анализируя производственные ситуации на объекте управления необходимо также оценить скорость изменения и вероятность возникновения при работе технологического комплекса быстрых («скачкообразных») возмущающих воздействий на объект. Так, для теплообменника скачкообразные изменения количества энергоносителя, поступающего из магистрали подачи (*ge*, кг/с) могут появиться при подключении / отключении дополнительных потребителей к магистрали.

#### Таблица 1

## Требования к качественным характеристикам при работе САР анализируемого объекта

Обозначение	Единица	Числнное	Housenopouro
	измерения	значение	Паимснование
nom tp2	°C	31,0	температура продукта на выходе ТО при номинальном равновесном ре- жиме (уставка регулятору – <i>ust t</i> p2)
±∆tp2	°C	±1,0	максимально допустимое отклоне- ние регулируемого параметра в ста- тике при работе САР (статическая ошибка)
±δtp2	۰C	±3,0	предельно допустимое кратковре- менное отклонение температуры продукта на выходе от номинала в переходном процессе (динамиче- ский заброс)
δτ	С	20	предельная продолжительность ди- намического заброса
Ψ	с	80	продолжительность перехода объек- та на новый статический режим (время регулирования)
$L \rightarrow min$	(°C)2	$\sum_{i=1}^{N} \left( \mathrm{Stp}  2 \left( i \right) \right)^{2}$	критерий оптимизации при выборе параметров настройки САУ (мини- мальная суммарная квадратичная ощибка)
nom gpy	кт/с	4,0	количество получаемого продукта (производительность)
±dgpy	кт/с	0,5	допустимые пределы отклонения производительности ТО

Рис. 3. Пример таблиц информационного обеспечения с результатами анализа производственных ситуаций при эксплуатации теплообменника (начало)

#### Таблица 2

## Константы, конструктивные, теплотехнические и технологические характеристики объекта

Обозна- чение	Единица изме- рения	Значение (min/nom/max)	Наименование
ср	кДж/(кг· °С)	4,1	удельная теплоемкость продукта
vp	м <sup>3</sup>	8	объем продукта, находящегося в ТО
pp	кг/м <sup>3</sup>	1075	плотность продукта
ſp	м <sup>2</sup>	25	площадь поверхности теплообмена продукта
ир	кДж/(кг∙м²- °С)	0,26	коэффициент теплопередачи про- дукта (при gpy=nom gp)
се	кДж/(кг∙ °С)	4,2	удельная теплоемкость энергоно- сителя
ve	M <sup>3</sup>	7	объем энергоносителя, находяще- гося в ТО
pe	кг/м <sup>3</sup>	1067	плотность энергоносителя
fe	<b>м</b> <sup>2</sup>	32	площадь поверхности теплообмена энергоносителя
ue	кДж/(кг∙м²- °С)	0,3	коэффициент теплопередачи энер- гоносителя (при gey=nom ge)
dτ	с	10	интервал интегрирования по вре- мени
а	-	0,4	коэффициент влияния скорости энергоносителя на теплопередачу
Ь	-	0,4	коэффициент влияния скорости продукта на теплопередачу

# Рис. 3. Пример таблиц информационного обеспечения с результатами анализа производственных ситуаций при эксплуатации теплообменника (продолжение)

#### Номинальные значения переменных на входе и выходе объекта, определяющие начальное равновесное состояние, а также возможный диапазон варьирования возмущающих и управляющих воздействий на объект

Обозна-	Единица	Значение	Нациорация
чение	измерения	(min/nom/max)	паименование
tp2	°C	31,0	температура продукта на выходе ТО
gp	кг/с	6 /8,0/ 10	расход продукта из промежуточного накопителя при полностью открытом регулирующем клапане (ур = 0 % ХРО)
tp1	°C	2 /10/ 20	температура продукта на входе в ТО
ge	кг/с	2 /6,0/ 10	расход энергоносителя из магистрали подачи при полностью открытом регу- лирующем клапане (уе = 0 % XPO)
te1	°C	60 /80/ 100	температура энергоносителя на входе в ТО
ур	%XPO	10 /50/ 90	управляющее воздействие на закрытие клапана подачи продукта в ТО
уе	%XPO	10 /50/ 90	управляющее воздействие на закрытие клапана подачи энергоносителя в ТО
te2	°C	52,7	температура энергоносителя на выходе ТО

Рис. 3. Пример таблиц информационного обеспечения с результатами анализа производственных ситуаций при эксплуатации теплообменника (окончание)

#### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОЗВЕННОГО ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ НА АНАЛОГОВОЙ МОДЕЛИ

Система уравнений, моделирующая преобразование информационных потоков и взаимодействие звеньев структурной схемы, полученная в предыдущем разделе (1-18), позволяет провести исследование статических и динамических характеристик объекта – проточного ТО как единой системы. Процедура исследования предусматривает решение такой системы уравнений с целью вычисления значений основных переменных параметров формируемых на выходе (te2 и *tp2*) в переходном процессе в различные моменты времени. При этом исследуется реакция объекта на отдельные возмущения заданной амплитуды, поступающие по различным каналам, например, по каналам расхода от источника подачи, величины закрытия клапана управления подачей и температуры на входе, соответственно, энергоносителя dge, dye, dte1 или продукта dgp, dyp, dtp1. Также может быть исследована реакция объекта на суммарное одновременное воздействие по нескольким каналам (суммарное максимальное возмущающее воздействие, выявленное при анализе условий эксплуатации объекта).

Решение системы уравнений модели объекта, в которую входят уравнения алгебраического и дифференциального типов, целесообразно осуществлять по методике численного интегрирования.

Результаты вычисления значений te2 и tp2 оформляются в табличной форме или в виде графиков  $te2 = f(\tau)$  и  $tp2 = f(\tau)$ , подобных приведенным на рис. 4.

На графиках необходимо выделить:

- область номинального статического состояния (0...25 c);

– момент времени внесения возмущения ( $\tau = 25$  c);

 – область перехода в состояние нового статического равновесия (25...400 с);

– область нового статического состояния (400...500 с).



Рис. 4. Вид графиков переходных характеристик при внесении возмущения (управляющего воздействия) dye = +20 %: 1 -температуры энергоносителя  $te2 = f(\tau)$ ; 2 -температуры продукта  $tp2 = f(\tau)$ 

## 3.1. Разработка и оформление расчетного модуля для исследования статических и динамических характеристик объекта

Ниже приведен текст программы *MODTO*, подготовленной для исследования характеристик проточного TO. Шаблон расчетного модуля программы *MODTO* оформлен в среде компилятора *Quick Basic* [12] и размещен в прил. 1 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-*10.zip]. В нем также размещено программное обеспечение, необходимое для работы на компьютере пользователя в среде *Quick Basic* – программа *MC DOC*: файл компилятора «*QB*», «Ярлык для *Microsoft Quick Basic*. Для работы с пособием по прил. 1 необходимо скопировать и установить содержимое папки на рабочий стол компьютера пользователя. При затруднениях в работе с прил. 1 следует вызвать через интернет справку «Компилятор *Quick Basic* » [13].

В программе *МОDTO* реализована процедура численного интегрирования системы уравнений (1) - (18) структурнопараметрической схемы ТО. Файл программы *МОDTO* выводится на экран из прил. 1. В тексте шаблона имеются комментарии, которые поясняют последовательность подготовки программы и ее использования при исследовании характеристик конкретного объекта.

Расчетная часть программы МОДТО состоит из двух блоков.

Первый блок «Расчет значений tp2(i) и te2(i) в статическом режиме» предназначен для циклического пошагового решения системы уравнений (1) - (18) при номинальных начальных условиях. В рассматриваемом примере установлено количество циклов для вычисления в начальном статическом состоянии W1 = 50 с шагом цикла M = 1. При вычислении приращений переменных tp2(i) и te2(i) учитывается интервал интегрирования по параметру времени – W (в шаблоне W = 10 с).

Текст программы МОDTO

#### 'MODTO.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 puc.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 диференциальных 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 возмуще-

ния.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 (ср,се,рр,ре,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 объ-

ект(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 '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;dye.

'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 - і.

'Шаг интегрирования - М.

M = 1

'Максимальное число шагов интегрирования - N.

N = 700

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

w1 = 50

'Масштаб по параметру времени (интервал интегрирования) - w , сек.  $w=10\,$ 

'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.\*м^2\*град.)

ue = .3: up = .26

'Плотность энергоносителя и продукта, кг/м^3

pe = 1067: pp = 1075

```
'Поверхность теплопередачи от энергоносителя и продукта, м^2 fe = 32: fp = 25
```

```
'Объём, занимаемый энергоносителем и продуктом, m^3 ve = 7: vp = 8
```

```
'Номинальные значения возмущающих и управляющих воздействий
'Температура энергоносителя на входе, град.
te1 = 80
'Расход энергоносителя на входе, кг/сек.
 ge = 6
'Температура продукта на входе, град.
tp1 = 10
'Расход продукта на входе, кг/сек.
 gp = 8
Управляющее воздействие по каналу расхода энергоносителя, %
XPO.
ye = 50
Управляющее воздействие по каналу расхода продукта, % ХРО.
yp = 50
Условия статического состояния объекта.
'Температура энергоносителя на выходе, град.
te2 = 52.53
'Температура продукта на выходе, град.
tp2 = 31.1
'Расчет значений tp2[i], (z) и te2[i],(z1)
'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))

'3BeHo 8

qf1 = kf * ((te1 + dte1) - (tp1 + dtp1))

'3BeHo 9

qf2 = kf * (te2 - tp2)

'3BeHo 10

qf = .5 * (qf1 + qf2)

dq = (qe1 - qe2 + qf) - (qf - qp1 + qp2)

'3BeHo 11

IF te2 - tp2 > 0 THEN dte2(i) = dq * w / (ce * pe * ve) ELSE dte2(i) = 0

te2 = te2 + dte2(i)

'3BeHo 12

IF te2 - tp2 > 0 THEN dtp2(i) = dq * w / (cp * pp * vp) ELSE dtp2(i) = 0

tp2 = tp2 + dtp2(i)
```

```
'Coxpaнeниe результатов
z1(i) = te2
z(i) = tp2
'Вывод на экран z(i)
PRINT "z(";
PRINT ; i;
PRINT ; i;
PRINT ")=";
PRINT USING "###.##"; z(i)
NEXT i
```

'Формирование возмущений и начальных условий для исследования
'Температура энергоносителя на входе (-20 ... +20), град. dte1 = 0
'Расход энергоносителя на входе (-4 ... +4), кг/сек. dge = 0
'Температура продукта на входе (-8 ... +10), град. dtp1 = 0
'Расход продукта на входе (-2 ... +2), кг/сек.

dgp = 0

'Управляющее воздействие по каналу расхода энергоносителя ' (-40 ... +40), % XPO. dye = 40 'Управляющее воздействие по каналу расхода продукта ' (-40 ... +40), % XPO. 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 б
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))
'Звено 9
qf2 = kf * (te2 - tp2)
'Звено 10
qf = .5 * (qf1 + qf2)
dq = (qe1 - qe2 + qf) - (qf - qp1 + qp2)
'Звено 11
IF te2 - tp2 > 0 THEN dte2(i) = dq * w / (ce * pe * ve) ELSE dte2(i) = 0
te2 = te2 + dte2(i)
'Звено 12
IF te2 - tp2 > 0 THEN dtp2(i) = dq * w / (cp * pp * vp) ELSE dtp2(i) = 0
```

tp2 = tp2 + dtp2(i)

```
'Coxpaнeниe результатов

z1(i) = te2

z(i) = tp2

'Bывод на экран z(i)

PRINT "z(";

PRINT ; i;

PRINT ")=";

PRINT USING "###.##"; z(i)

NEXT i

'Печатать данные для оформления графика.

INPUT "Печатать результаты? Да -1, Нет -0"; r

IF r = 0 THEN GOTO 10

d$ = "C:\REZULTAT\" + "dto" + ".txt"
```

```
OPEN d$ FOR OUTPUT AS #1
FOR j = 1 TO N
```

```
PRINT #1, USING "###"; j;
```

```
PRINT #1, USING "###.##"; z(j);
```

```
PRINT #1, USING "###.##"; z1(j)
```

NEXT j

'Численные значения контрольных точек 10 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

Второй блок программы «Расчет значений z(i)=tp2(i) и z1(i)=te2(i) – реакции на возмущение.» предназначен для решения системы уравнений 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 выхода численных значений tp2(i) и te2(i) в область нового статического состояния (см. рис. 4). В примере шаблона задано количество циклов N = 700 с шагом цикла M = 1.

Все численные значения выходных переменных tp2(i) и te2(i) сохраняются в выходном модуле программы в табличной форме.

По ходу вычислений по второму блоку в программе предусмотрен запрос о необходимости вывода результатов на печать. При положительном ответе на вопрос результаты в формате текстатаблицы «*dto*» пересылаются и записываются в программный модуль «C:\*REZULTAT*» для последующей обработки и оформления переходных характеристик объекта (см. «АЛГОРИТМ» в прил. 2 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*]).

По завершении цикла вычислений по программе «*MODTO.BAS*» на экран вывода *QB* выводятся численные значения выходных параметров при номинальном статическом состоянии z(W1) = tp2(W1), z1(W1) = te2(W1) и при новом статическом состоянии z(N) = tp2(N), z1(N) = te2(N).

Эти значения в комплексе с введенным численным значением возмущения следует переписать в столбец таблицы вида, представленного на рис. 5 для накопления результатов.

Выбранное возму- щающее	dtp1	-8,0	-6,0	-4,0	-2,0	0,0	2,0	4,0	6,0	8,0	10,0
воздей- ствие	tp1+ + dtp1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Выходные	tp2(i)	26,82	27,89	28,86	30,00	31,10	32,17	33,24	34,31	35,38	36,45
параметры	te2(i)	47,72	48,93	50,13	51,30	52,50	53,74	54,94	56,14	57,34	58,54

Рис. 5. Пример оформления таблицы результатов исследования статических характеристик теплообменника tp2 = f(tp1) и te2 = f(tp1)

Заполненная таблица рис. 5 переносится в шаблон расчетной программы «*CTAT*» «РИС. 7» или «РИС. 8», размещенные в прил. 2 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*]. В папке «*CTAT*» производится обработка и оформление статических характеристик объекта. Пример полностью заполненной таблицы представлен на рис. 5.

# 3.2. Алгоритм работы с расчетным модулем МОDTO

Исследование характеристик объекта с использованием шаблона *МОDTO* осуществляется по следующему алгоритму.

Подготовка программы:

 – занести в обозначенные строки программы численные значения констант входных и выходных переменных (см. табл. 2 и 3 на рис. 3), соответствующих номинальному статическому состоянию объекта;

 – установить в разделе программы «Формирование возмущений» нулевые значения отклонений от номинала всех возмущающих и управляющих воздействий;

– запустить программу (результаты во внешние файлы не выводить!), убедиться в сохранении условий номинального статического состояния, при котором после завершения процесса вычисления и в период цикла счета – значения контрольных точек постоянны: z(W1) = z(N) = nom tp2 и z1(W1) = z1(N) = nom te2;

– если условие номинального статического состояния не выполняется, необходимо корректировать исходные данные, например, выбрать такое соотношение расходов продукта *nom gp* и энергоносителя *nom ge*, при котором  $tp2 = f(\tau) = nom tp2 = coNst$ ;

 – в состоянии номинального равновесия в разделе программы «Формирование возмущений» ввести одно из максимальных отклонений возмущений (рис. 3 табл. 3);

– запустить программу и по численным значениям контрольных точек убедиться в завершении цикла перехода на новое равновесное состояние, при этом численные значения z(N) и z1(N) изменились и стабилизировались на новых значениях.

– откорректированную программу в режиме номинального статического состояния объекта, сохранить и использовать для даль-

нейшего исследования статических и динамических характеристик объекта.

Статические характеристики объекта типа tp2 = f(tp1), tp2 = f(yp) и др. исследуют с использованием расчетного шаблона *МОDTO* поочередно для каждого канала возмущения или управления.

При исследовании статических характеристик объекта расчетную программу *МОDTO* многократно запускают из номинального статического состояния. На данной операции вывод результатов на печать не включают. Перед каждым запуском в разделе «Формирование возмущений» вводят новое значение анализируемого возмущения из диапазона варьирования (см. табл. 3 на рис. 3). После завершения цикла вычислений, с экрана записывают в таблицу (рис. 5) численные значения выходных параметров в новом установившемся режиме z(N) = tp2(N) и z1(N) = te2(N), где N – число шагов интегрирования по программе. На рис. 5 приведен фрагмент таблицы с результатами исследования статических характеристик tp2 = f(tp1)и te2 = f(tp1) проточного TO.

Данные, собранные в таблицу (рис. 5), переносят в шаблон «*CTAT*». В шаблоне «*CTAT*» приведена программа обработки и оформления статических характеристик, полученных при исследовании на «*MODTO*» (см. рис. 6 и рис. 7). В программе при обработке используются процедуры «Считающих таблиц» и «Мастер диаграмм» «*Excel*».

При вводе в считающую таблицу результатов исследования автоматически выполняется их обработка и оформление статических характеристик объекта по данному каналу возмущения в табличной, графической и аналитической форме.

Динамические характеристики объекта исследуют с использованием шаблона «*MODTO*» поочередно для каждого канала возмущения.

При исследовании динамических характеристик объекта расчетную программу «*MODTO*» запускают из номинального состояния. Перед запуском в разделе программы «Формирование возмущений» вводится максимальное отклонение возмущения по исследуемому каналу, например, dtp1 = max tp1 - nom tp1 = 10 °C (см. табл. 3 на рис. 3). В цикле расчёта на экран вывода *QB* выводятся в табличной форме вычисленные значения точек на переходных характеристиках tp2=f(tp1) и te2=f(tp1). Результат сохраняется.

Таблицу значений переходных характеристик, сформированных программой «*MODTO*», необходимо передать в файл папки обработки «*REZULTAT*» в прил. 2 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-*10.zip].

Передача таблицы выполняется процедурой компилятора «*QBasic*» «Записать в файл» по запросу в тексте программы «*MODTO*» «Печатать результаты? Да – 1 Нет – 0». При положительном ответе запускается процедура передачи текстового файла (для ТО имя файла «*dto*») в папку «*REZULTAT*».

В папке «*REZULTAT*» текстовый файл «*dto*» преобразуется в числовую таблицу, которая сохраняется под своим именем как файл *Excel* в папке «ГРАФ».

Шаблон «ГРАФ» позволяет производить:

 – оформление с использованием «Мастера Диаграмм» численных значений координат в виде графика переходной характеристики и обработку графика для оформления в форму рисунка в отчет;

– обработку графика экспоненциальной кривой с целью определения математической формы записи динамических свойств объекта (дифференциального уравнения, передаточной функции).

В прил. 2 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip] размещен модуль «Алгоритм» с описанием процедуры передачи текстового файла в папку «REZULTAT» по команде «d\$» из программ «QBasic» и последующего их преобразования и оформления.

# Переработка программы *МОDTO* при изменении производственных ситуаций

Расчетную программу *MODTO* можно использовать как шаблон при подготовке и оформлении собственной программы для исследования объекта. В этом случае все действия по переработке программы проводят в среде *Quick Basic*.

Переработку программы следует начинать с копирования шаблона программы *MODTO* под своим именем и проверки работы копии по прямому назначению по командам из меню компилятора *QB*. При переработке программы учитываются все изменения, внесенные в прототип по результатам анализа нового объекта в разделе 2:

– изменяют уравнения звеньев на вновь разработанные в блоках программы «Расчет численных значений tp2(i) и te2(i) в статическом режиме» и «Расчет значений tp2(i) и te2(i) и построение переходной характеристики – реакции на возмущение»;

– вводят новые значения в разделы программы «Конструктивные и технологические характеристики объекта», «Номинальные значения возмущающих и управляющих воздействий» и «Формирование возмущений и начальных условий для исследования».

При проверке переработанной программы необходимо определить условия статического равновесия при нулевых отклонениях всех возмущающих воздействий и записать их в графу «Условия статического состояния».

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

# 3.3. Определение статических характеристик объекта с использованием расчетного модуля *МОDTO*

Для реализации оптимальной системы автоматического регулирования многозвенного объекта необходимо оценить возможные статические (равновесные) состояния объекта в диапазоне варьирования всех возмущающих и управляющих воздействий. Подготовленное в разделе 2 информационное и математическое обеспечение позволяет исследовать парные статические зависимости для всех выходных и входных переменных, выявленных при анализе объекта.

Для теплообменника, схемы анализа которого представлены на рис. 1 и 2, подлежат определению следующие статические характеристики:

$$-tp2=f_1(tp1), tp2=f_2(gp), tp2=f_3(yp), tp2=f_4(te1), tp2=f_5(ge), tp2=f_6(ye);$$
  
 $-te2=f_7(tp1), te2=f_8(gp), te2=f_9(yp), te2=f_{10}(te1), te2=f_{11}(ge), te2=f_{12}(ye).$ 

Статические характеристики, перечисленные выше, определяют с использованием считающей программы *MODTO* раздельно для каждого возмущающего и управляющего воздействия.

При запуске *MODTO* ступенчатые изменения – отклонения возмущающего воздействия от номинала, например, dtp1 = +2, +4, ..., -2, -4 и т. д., в диапазоне варьирования обеспечивают получение численных значений откликов tp2(N) и te2(N) при переходе в новое статическое состояние, где N – число шагов интегрирования.

Совокупность статических характеристик для рассмотренного выше объекта – ТО можно получить, изучая реакцию объекта на изменения каждого из возмущающих и управляющих воздействий с использованием программы МОДТО. В этом случае в строке программы «Формирование возмущений» последовательно вводят ступенчатые отклонения от номинала одного из возмущающих воздействий. На каждом шаге отклонения возмущения запускают программу, и после завершения расчета вносят в таблицу результатов (рис. 5) значения возмущающего воздействия и записывают с экрана дисплея численные значения выходных параметров в новом установившемся состоянии объекта: Z(N) = tp2(N) и Z1(N) = te2(N), где N – число шагов интегрирования. Эксперимент повторяют для 6-8 положительных и отрицательных численных значений отклонений данного возмущающего воздействия от номинала. Для последующей обработки результаты, внесенные в таблицу, переносят в файл обработки, оформленный в виде шаблона CTAT [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip, рис. 6 и рис. 7].

В шаблоне «*CTAT*» таблица результатов представлена как «считающая таблица» на листе *Excel*, что обеспечивает оформление полученной статической характеристики в виде диаграммы и преобразование её в другие математические формы.

По данным, внесенным в таблицу, программа *CTAT* определяет статическую характеристику в форме численных значений физических параметров стандартной размерности, что позволяет наглядно анализировать физический смысл взаимодействия входных и выходных переменных объекта в исследуемом диапазоне изменения производственных ситуаций.

В шаблоне «*CTAT*» реализована программа обработки результатов для получения других форм статических характеристик.

Программой шаблона предусмотрен автоматический переход к виду статических характеристик в приращениях или в отклонениях от номинала:

$$-dtp2=f_{1d}(dtp1) u dte2=f_{7d}(dtp1);$$
  
$$-dtp2=f_{6d}(dye) u dte2=f_{12d}(dge).$$

Представление статических характеристик в форме **приращений** – численных значений либо отклонений входных и выходных переменных от начального равновесного состояния, обеспечивает кусочно-линейную аппроксимацию полученных результатов с меньшей погрешностью. Это может потребоваться при **нелинейной форме статической характеристики**. Так, в рассматриваемом примере TO кусочно-линейная аппроксимация целесообразна для статических зависимостей вида tp2 = f(ye), te2 = f(ye).

Шаблоном также предусмотрено представление статических характеристик в безразмерной форме:

$$Z1 = f_{1b}(X1)$$
 и  $Z2 = f_{7b}(X1);$ 

$$Z1 = f_{6b}(Y1) \ u \ Z2 = f_{12b}(Y1),$$

где  $Z1 = \frac{dtp2}{tp2_{nom}}$ ,  $Z2 = \frac{dte2}{te2_{nom}}$ ,  $X1 = \frac{dtp1}{gp_{nom}}$ ,  $Y1 = \frac{dye}{ye_{nom}}$ .

Представление статических характеристик в **безразмерной форме** обеспечивает переход к передаточным функциям и использованию амплитудно-частотных методов исследования объекта при создании САР [8].

Для каждого вида статических характеристик, представленных в табличной форме в шаблоне «*CTAT*», предусмотрена возможность формирования точечной диаграммы. При этом используется «Мастер диаграмм» *Excel* – для корректировки вида шкал, диапазона варьирования и размерности переменных, а также для получения линии тренда с оценками погрешности аппроксимации статической характеристики алгебраическими уравнениями. В качестве примера на рис. 6 и рис. 7 приведен вид шаблона «*CTAT*» с результатами исследования и обработки статических характеристик:

 $-tp2 = f_1(tp1)$  и  $te2 = f_7(tp1)$  – реакция ТО на внешнее неуправляемое возмущающее воздействие (рис. 6);

 $-tp2 = f_6(ye)$  и  $te2 = f_{12}(ye)$  – реакция ТО на управляющее воздействие, вносимое с целью компенсации изменения, обусловленного внешним неуправляемым возмущающим воздействием (рис. 7).

В примере, приведенном на рис. 6, графический вид статических характеристик  $tp2 = f_1(tp1)$  и  $te2 = f_7(tp1)$  для диапазона варьирования адекватно описывается линейными алгебраическими уравнениями (уравнения линии тренда) в размерных единицах:

$$tp2 = k1 \cdot tp1 + tp2(0) = 0,5367 \cdot tp1 + 25,722,$$
$$te2 = k2 \cdot tp1 + te2(0) = 0,6012 \cdot tp1 + 46,518$$

или в отклонениях:

$$dtp2 = k3 \cdot dtp1 = 0,5365 \cdot dtp1,$$
  
 $dte2 = k4 \cdot dtp1 = 0,6011 \cdot dtp1.$ 

Уравнения статики в отклонениях в безразмерном виде:

$$Z1 = K_{Z1} \cdot X1$$
 u  $Z2 = K_{Z2} \cdot X1$ ,  $Z1 = 0,1145 \cdot X1$  u  $Z2 = 0,1725 \cdot X1$ ,

где X1 – отклонение возмущающего воздействия  $\Delta tp1$  от номинального значения, выраженное в безразмерных единицах:  $X1 = \frac{\Delta tp1}{tp1_{nom}}$ ; Z1 – отклонение выходного параметра tp2 от номинального значения в безразмерном виде:  $Z1 = \frac{\Delta tp2}{tp2_{nom}}$ ; Z2 – отклонение выходного параметра te2 от номинального значения в безразмерном виде:  $Z2 = \frac{\Delta te2}{te2_{nom}}$ .

На рис. 6 коэффициенты  $K_{Z1} = 0,1145, K_{Z2} = 0,1725.$ 

В примере на рис. 7 алгебраические описания характеристик  $tp2=f_6(ye)$  и  $te2 = f_{12}(ye)$  в линейной форме дают существенную по-

грешность ( $R^2 = 0,9595$ ) – характеристики нелинейны. На рис. 7 представлен вариант кусочно-линейной аппроксимации. Диапазон варьирования управляющего воздействия разделен на два участка – положительные и отрицательные отклонения от номинала *nom ye* = 50 %ХРО. Для каждого участка линейные уравнения линии тренда обеспечивают существенное снижение погрешности расчетов ( $R^2 = 0,9917$  и  $R^2 = 0,9848$ ).

После определения статических характеристик при всех возможных производственных ситуациях на объекте, выбирается структура и алгоритм системы автоматизированного управления (САУ) технологическим комплексом.

Оценивается управляемость объекта – возможность за счет изменения управляющих воздействий (*ye*, *yp*) скомпенсировать недопустимые отклонения от номинала выходных качественных характеристик продукта – количества продукта на выходе аппарата *nom gpy*  $\pm$  *dgpy*, кг/с, и температуры продукта *nom tp*2  $\pm$  *dtp*2, °C, при любых изменениях неуправляемых возмущающих воздействий (*tp*1, *gp*, *te*1, *ge*) в диапазоне варьирования.

Так, в рассматриваемом примере TO (рис. 1), возможно отклонение параметров энергоносителя ge и/или te1 в сторону снижения / повышения, что приведет к снижению/повышению его энергетического потенциала и к невозможности обеспечить нагревание продукта до nom tp2  $\pm$  dtp2 даже при управляющем воздействии max Ye. В подобных ситуациях необходимо в структуре CAУ предусмотреть дополнительные контуры регулирования «по возмущению». В приведенном примере возможно использовать дополнительный контур, обеспечивающий управление расходом продукта yp для восстановления равновесного состояния. Но при этом необходимо учитывать ограничения на производительность TO min gpy и max gpy (см. табл. 1 на рис. 3).

В результате анализа производственных ситуаций на объекте может быть установлена необходимость периодического перехода на выпуск продукции с другими численными значениями качественных показателей. Например, переход на выпуск из ТО (рис. 1) продукта с более высокой/низкой температурой *nom tp* $2 \approx 40$  °C (уставка регулятору, см. табл. 1 на рис. 3). В этом случае необходимо, изменяя численные значения *nom gpy* и *nom gey*, по энергетическому балансу определить новые номинальные численные значения входных и вы-

ходных переменных для начального статического состояния и вновь исследовать все статические характеристики, сохраняя условия эксплуатации объекта.

Исследование статических характеристик объекта на структурно-параметрической модели позволяет оценить возможность и целесообразность реализации в САУ задач повышения уровня автоматизации технологического комплекса.

Так, новое начальное состояние *nom* tp2 = ust tp2 = coNst при изменении *ust* tp2 обеспечивается при различных сочетаниях расходов *nom* gpy и *nom* gey. Используя систему уравнений (1) – (18), можно сформулировать и решить задачу поиска сочетания варьируемых численных значений расходов *nom* gpy = opt gpy и *nom* gey = opt gey, которые поддерживают на выходе TO повышенное / пониженное значение *nom* tp2 = ust tp2 и при этом реализуется критерий оптимизации, например, «максимальное использование энергетического потенциала энергоносителя», заданный в виде функционала:  $L = (te1 - te2) \rightarrow max$ .

В рассматриваемом примере ТО можно оценить целесообразность создания системы **мониторинга** изменения характеристик теплообменника, например, постепенного изменения коэффициентов теплопередачи (см. табл. 2 на рис. 3) в уравнениях (1) – (18), вследствие образования отложений на теплообменной поверхности.

Для мониторинга в САУ включают контур периодического контроля разности температур te1 - te2 в статическом состоянии объекта. Последующая статистическая обработка, накопление информации и построение графиков изменения во времени результатов измерения te1 - te2 позволяют предупредить разладку оборудования за допустимые пределы.

Работа такой системы рассматривается в книге: авторы Алёшичев С.Е., Балюбаш В.А., Стегаличев Ю.Г. Технологический анализ и моделирование многоканальных технологических комплексов: Учеб. пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 121 с.

51









# 3.4. Определение динамических характеристик объекта с использованием расчетного модуля *МОDTO*

При структурно-параметрическом анализе технологического комплекса исследование динамических свойств комплекса проводится с целью оценки влияния инерционных звеньев, выявленных при анализе структуры объекта на скорость и искажения при передаче информации о быстрых (скачкообразных) изменениях входных возмущений и управляющих воздействий к характеристикам качества, формируемым на выходе комплекса.

Для исследования динамических свойств объекта используют шаблон *MODTO* с целью построения переходной характеристики («разгонной кривой») объекта как реакции на скачкообразное изменение одного из возмущающих или управляющих воздействий (рис. 4).

Для полного исследования динамики объекта необходимо последовательно получить графики переходных характеристик при положительных и отрицательных отклонениях возмущающих и управляющих воздействий, вызывающих максимальное изменение откликов tp2 и te2. Оценить степень влияния можно по диапазону варьирования возмущения (см. табл. 3 на рис. 3) и численному значению коэффициента передачи в уравнениях статики (рис. 6).

В структуре рассматриваемого примера – проточного ТО – выделены два инерционных звена, имеющие независимые входы и взаимосвязанные выходы (звенья 11 и 12 на рис. 2) – параллельная схема включения инерционных звеньев. В этом случае инерционные свойства объекта различны при возмущении на входе звена 11 (канал поступления продукта в ТО) или на входе звена 12 (канал поступления энергоносителя в ТО) и графики переходных характеристик необходимо получить при подаче возмущений по каждому каналу.

Переходную характеристику как реакцию объекта на максимальное скачкообразное изменение возмущающего воздействия получают, используя считающую программу «*MODTO*». Результат исследования сохраняется в табличной форме.

Для дальнейшей обработки и оформления таблицу результатов передают в папку обработки «*REZULTAT*». Процедура передачи и изменения формата результата «*dto*» изложена в файле «АЛГО-РИТМ» [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*, прил. 2.].

Преобразованный файл результатов анализируется и оформляется в виде документа в программном шаблоне «РИС. 8» в папке «ГРАФ» [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip, прил. 2.]. В шаблоне сохранён пример обработки результатов исследования динамических характеристик ТО (рис. 8а и рис. 8б).



Рис. 8а. Динамические характеристики теплообменника  $tp2 = F_3(dye, \tau)$ и  $te2 = F_4(dye, \tau)$  при возмущении по каналу энергоносителя dye = 40 %ХРО

tp 2(w 1)	tp 2(N)	tp 2(T)	dye	te 2(w 1)	te $2(N)$	te $2(T)$	dye
0,00	0,00	0,00	40	0,00	0,00	0,00	40
w 1	To	T	Ko	w 1	To	Т	Ko
50	173	223	0,00	50	173	223	0,00

Рис. 8б. Фрагмент шаблона ГРАФ с результатами обработки переходной характеристики ТО при возмущении по каналу подачи энергоносителя dye=40 % ХРО

В шаблоне «РИС. 8» приведен пример обработки результатов исследования динамических характеристик TO  $tp2 = F_p(dye,\tau)$  и  $te2 = F_p(dye,\tau)$  с целью определения коэффициентов уравнений динамики вида:

$$T_p = \frac{dtp2}{d\tau} + dtp2 = k_p \cdot dye$$

И

$$T_e = \frac{dte2}{d\tau} + dte2 = k_e \cdot dye \; .$$

В левой части рис. 8а – табличная форма переходных характеристик, полученная при расчётах в «*МОDTO*». В центре рисунка графическая форма характеристик, полученная с использованием «Мастера диаграмм». В верхней части листа (рис. 8б) «считающая таблица *Excel*», которая используется для определения численных значений коэффициентов  $T_p$ ,  $k_p$ .

В ячейку *dye* следует внести обозначение и численное значение возмущающего воздействия при данном исследовании (в примере dye = 40 % XPO).

В ячейку обозначенную «W1» внести численное значение момента внесения возмущения, а в ячейку tp2(W1) численное значение параметра в номинальном статическом состоянии. На рис. 8a, 8б tp2(W1) = 31,1 °C, W1 = 50.

Выделяя курсором точки на графике, определить и внести в ячейку «*N*» численное значение параметра в этой точке.

В ячейке  $k_p$  – автоматически рассчитывается численное значение коэффициента передачи по уравнению  $k_p = \frac{tp2(W) - tp2}{dye}$ ,

 $k_p = 0.35 \text{ °C/\% XPO}.$ 

В ячейке *tp*2(*R*) – автоматически рассчитывается численное значение реперной точки по уравнению:

$$tp2(R) = tp2(W1) - 0,63(tp2(W1) - tp2(N)).$$

Выделяя точки на графике, определить и внести в ячейку W(R) численное значение времени выхода на значение tp2(R) (на рис. 8а tp2(R) = 22,29 °C и W(R) = 223 с).

В ячейке Tp автоматически рассчитывается численное значение по уравнению Tp = W(R) - W1 постоянной времени объекта (Tp = 173 c).

Аналогичным образом определяются коэффициенты *Te* и *ke* (рис. 8a, 8б).

При использовании шаблона «ГРАФ» для обработки новых динамических характеристик необходимо «очистить» содержимое, перенести в шаблон новые исходные данные и заполнить бланк «считающей таблицы» [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip, прил. 2].

# 3.5. Программы и модуль для исследования динамических и статических характеристик, реализованные в «*Visual Basic*». Стенд для проведения лабораторных занятий по теме

Программный шаблон *MODTO*, рассмотренный в разделе 3.1 пособия, позволяет наглядно, по шагам ознакомиться с процедурой исследования переходных характеристик на аналоговой модели объекта, а также с результатами, оформленными в виде таблицы.

Компилятор *QBasic*, в среде которого работает *MODTO*, русифицирован, содержит развитую систему справок и контроля ошибок при корректировке программы и её использовании, что существенно облегчает изучение основной задачи – исследование статических и динамических характеристик объекта.

Однако последующая обработка результатов с целью получения графических и математических описаний характеристик объекта и оформление их в документальной форме связана с громоздким переходом из компилятора *QBasic*, работающего в среде *DOC* в среду *Excel Visual Basic*.

В прил. 3 размещен модуль *TO VBEx*, работающий в среде *Excel*. При подготовке этого модуля использовались возможности *Visual Basic* (*VB*) [14, 15].

В среде «VB» реализована вычислительная программа численного интегрирования модели объекта с целью определения переходных характеристик объекта по алгоритму, приведенному в разделе 3.1 пособия. В модуле, в качестве примера, набрана задача исследования характеристик теплообменника (ТО), структурно-параметрический анализ которого приведен в разделе 2.

При вызове файла ТО VBEx в среде Excel (макросы не отключать!) на экран выводится лист «sheet1» (ярлык в левом нижнем углу экрана). На экране Таблица результатов (см. фрагмент на рис. 9) – табличная форма результатов предыдущего исследования переходных характеристик объекта.

i	dz(i)	dz1(i)	z(w1)	z1(w1)	z(N)	z1(N)	tp2(i)	te2(i)	w1
10	0,16	-0,14	30,95	52,75	22,41	50,93	30,98	52,73	50
20	0,10	-0,06					30,97	52,74	
30	0,06	-0,03					30,96	52,75	
40	0,02	-0,01					30,96	52,75	
50	0,00	0,00					30,95	52,75	
60	-14,52	-0,47					28,05	52,66	
70	-24,03	-1,87					26,15	52,38	
80	-30,28	-3,42					24,90	52,07	
90	-34,42	-4,82					24,07	51,79	
100	-37,16	-5,95					23,52	51,56	
110	-38,99	-6,83					23,15	51,39	
120	-40,21	-7,49					22,91	51,26	
130	-41,03	-7,97					22,75	51,16	
140	-41,58	-8,32					22,64	51,09	
150	-41,95	-8,56					22,56	51,04	
160	-42,20	-8,74					22,51	51,01	
170	-42,36	-8,86					22,48	50,98	
180	-42,48	-8,94					22,46	50,97	
190	-42,55	-9,00					22,44	50,95	
200	-42,61	-9,04					22,43	50,95	

Рис. 9. Результаты расчета по программе ТО VBEx (фрагмент)

В первую строку Таблицы результатов вынесены также численные значения выходных переменных на двух участках переходной характеристики:

в начальном – до внесения возмущения z(W1)=tp2(W1), z1(W1)=te2(W1);

и конечном – после внесения возмущения z(N)=tp2(N), z1(N)=te2(N).

Эти значения необходимы для исследования статических характеристик объекта.

В процессе исследования численные значения, не выходя из программы, переносят в таблицу исходных данных на лист «*CTAT*» (ярлык в левом нижнем углу экрана), где размещена программа обработки и анализа результатов (рис. 8а, 8б).

Щелкнув ярлык в левом нижнем углу экрана можно перейти на лист «ГРАФ», где полученные в данном эксперименте переходные характеристики представлены в графической форме и могут быть использованы для оформления документа и анализа динамических свойств объекта (рис. 8а, 8б).

Для дальнейшей работы с расчётной программой необходимо вызвать на экран текст программы. Для вызова – выделить ярлык «*sheet*1». Открыть «выпадающее» меню и щелкнуть «Исходный текст». На экране появится расчетная программа (ярлык «лист1») – аналог считающей программы *MODTO* (см. рис. 4), реализованная в среде *VB*. Возврат к «*sheet*1» – командой закрыть «Исходный текст».

Процедуры подготовки исследования переходных характеристик в бланке «ТО *VBEx*» аналогичны рассмотреным в разделе 3.2 данного пособия. Необходимые для расчёта переходных характеристик числовые значения переменных и констант записывают в обозначеные строки «исходного текста» на «лист1».

Запуск программы для расчета осуществляется из меню «VB» командой «RUN». После завершения цикла счёта — закрыть («\*») меню «VB».

На экране лист «*sheet*1» с новыми результатами определения переходной характеристики. На листе «граф» – графическая форма этих характеристик.

Для получения статических характеристик из верхней строки листа «*sheet*1» переносят на лист «*CTAT*» в один из столбцов верхней таблицы численные значения контролируемых параметров на новом установившемся режиме Z(N) и Z1(N), а также записывают в таблицу значение поданного возмущения.

Получение статической характеристики для заданного диапазона варьирования данного возмущения осуществляется многократным повторением операции формирования переходных характеристик при ступенчатых изменениях численного значения возмущения. На листе «*CTAT*» размещена программа обработки статических характеристик. Пример исследования статических характеристик ТО в разделе 3.3 (рис. 8а, 8б).

Динамические свойства исследуемого объекта оцениваются по переходной (разгонной) характеристике, размещенной на листе «граф». Для такой оценки может быть использован шаблон «ГРАФ» (см. раздел 3.4 и рис. 8а, 8б).

Расчетную программу, «*TO VBEx*» можно использовать как шаблон при подготовке исследования статических и динамических характеристик других объектов (см. в разделе 3.1. «Переработка программы....»). В этом случае все действия по переработке проводят в среде «*VB*». Вызов на экран файла «Лист 1» кнопкой «Исходный текст». Процедуры по переработке осуществляются с использованием меню «*VB*» (не русифицировано!)

В прил. 3 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*] размещен шаблон модуля «*TO ExVB*» в котором расчетная программа модуля «*TO VBEx*» дополнена блоком «Панель управления».

Через «Панель управления» выполняются все операции по исследованию переходных характеристик и их обработке (без захода в считающую программу на «VB»).

На рис. 10 – фрагмент листа «*sheet*1», который открывается при запуске в «*Excel*» шаблона «*TO ExVB*».

В нижней части листа на рис.10 – фрагмент таблицы результатов исследования переходных характеристик (аналог таблицы в программе *«TO VBEx»* см.рис. 9).

В верхней части листа на рис. 10 представлена «Панель управления».

														w 1	50												
	/щений и	ений	(-10 +20)	(-2 +2)	(-8 +10)	(-2 +2)	(-40 +40)	(-40 +40)						te 2(i)	52,72	52,73	52,73	52,73	52,73	52,73	52,73	52,73	52,73	52,73	52,73	52,73	52,73
	Формнрованне возму начальных знач		0	0	0	0	0	0					C6poc	$tp \ 2(i)$	30,98	30,97	30,96	30,96	30,95	30,95	30,95	30,95	30,95	30,95	30,95	30,95	30,95
			dte 1 =		dtp <b>1</b> =	dgp =	dye =	dyp =						Z <b>1</b> (N)	52,73												
	а тического	т объекта	52,7	31,0									Ų	Z(N)	30,95												
	Условия ст	Условня ст состояния te 2 = tp 2 =							C6po	Z 1(W 1)	52,73																
	Н оминальные значения управляющих и возмущающих воздействий		80,0	6,0	10,0	8,0	50,0	50,0					0	Z (W 1)	30,95												
			te 1 =	= <i>28</i>	tp 1 =	gp =	ye =	yp =					C6poo	dz <b>1</b> (i)	-0,08	-0,03	-0,01	0,00	0,00	0,00	00,00	00,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
зка	тивные и ические	рнстики екта	4,2	4,1	0,3	0,25	1067	1075	32	25	0,7	1,08	Ų	dz(i)	0,13	0,07	0,04	0,01	0,00	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02
Спрае	К онс трук технолог	характе обы	Ce =	cb =	= <i>∂n</i>	= dn	= <i>∂d</i>	= dd	fe =	f = f = 0 $v = 0$ $v = 0$		C6po	i	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	110,00	120,00	130,00	
лать	a HTbI,	анты, цие работу іммы			50	10	5	5					SC	Z (j)	31,00	31,00	30,99	30,99	30,99	30,99	30,99	30,98	30,98	30,98	30,98	30,98	30,98
Paccu	Kohch	= M	N =	w 1 =	= <i>M</i>	γ1 =	× =					C6pc	i	1	2	3	4	5	9	7	8	6	10	11	12	13	

Рис. 10. ТО ЕхVВ. Панель управления (лист «sheet1»)

Над панелью управления – кнопка «Справка», вызывающая информацию о назначении программы и порядке её использования.

Кнопка «Рассчитать» запускает цикл расчета искомой переходной характеристики для численных значений параметров, набранных в столбцах исходных данных на панели управления программой.

В строках Панели управления программой в качестве примера указаны исходные данные, необходимые для исследования характеристик проточного ТО. Численные значения исходных данных соответствуют номинальному равновесному состоянию ТО (см. табл. 1–3 на рис. 3). В процессе исследования численные значения исходных данных в ячейках панели можно изменять нажатием клавиш «Сброс» численные значения исходных данных в каждом столбце. Панели управления. Числа возвращаются к номинальным значениям.

По завершении цикла расчета в таблицу результатов выводятся координаты всех расчетных значений выходных параметров tp2(i) и te2(i), полученных при определении переходной характеристики ТО при последнем нажатии кнопки «Рассчитать».

При любых исследованиях статических и динамических характеристик объекта с использованием модуля ТО ExVB в таблицах панели управления необходимо установить параметры номинального равновесного состояния (см. табл. 2 и 3 на рис. 3). Динамические свойства объекта анализируются по переходной характеристике (см. рис. 6). Для ее получения в столбце «Формирование возмущений» панели управления выделяют отклонение исследуемого канала возмущения, например, «*dtp1* =» и набирают максимальное численное значение параметра, например, dtp1 = +10 (см. табл. 3 на рис. 3). Кнопкой «Рассчитать» запускается программа расчета переходной характеристики и вывод результатов в таблицу результатов на листе «sheet1» (фрагмент см. на рис. 10) и в графической форме на лист «ГРАФ». После завершения расчета кнопкой «Сброс» в столбце «Формирование возмущений» восстанавливается начальное равновесное состояние. Последующее оформление и анализ переходной характеристики с целью исследования динамических свойств объекта выполняется по алгоритму, изложенному в разделе 3.4 (см. рис. 8а, 8б).

Статические свойства объекта анализируются с использованием листа «*STAT*» по диаграммам – статическим характеристикам, определяющим парную взаимосвязь в статических равновесных состояниях между параметрами, формируемыми на выходе объекта, и внешними управляющими возмущениями, например, tp2 = f(tp1), te2 = f(tp1) и tp2 = f(ye), te2 = f(ye).

Для получения статических характеристик TO с использованием модуля *TO ExVB* необходимо в столбце «формирование возмущений» панели управления выделить отклонение исследуемого возмущения и набрать численное значение первой ступени отклонения от номинала данного возмущения, например, dtp1 = +1, что обеспечит ввод на шаге i = W1 интегрирования в уравнениях модели возмущения

$$tp1(N) = tp1_{nom} + dtp1 = 10 + 1 = 11$$
 °C.

Кнопкой «Рассчитать» запускается программа расчета перехода на новое установившееся состояние и вывод результатов в таблицу результатов на «*sheet*1». После завершения расчетов численные значения отклонений возмущения dtp1 и соответствующие новому равновесному состоянию объекта z(N) = tp2(N) и z1(N) = te2(N) из первой строки таблицы результатов переносят на лист «*STAT*» в столбец таблицы исходных данных и записывают в таблицу шаблона «*CTAT*» (см. рис. 6 и рис. 7).

Кнопкой «Сброс» в столбце «Формирование возмущений» восстанавливается начальное равновесное состояние.

В столбце «Формирование возмущений» вводится новое значение отклонения данного возмущения, например, dtp1 = +2. Цикл расчета и переноса результатов на лист «*CTAT*» повторяется до заполнения таблицы исходных данных на листе «*CTAT*».

Вывод на печать результатов исследования статических и динамических характеристик объекта осуществляется с листов «ГРА $\Phi$ » и «*СТАТ*» с использованием меню «*Excel*».

# 3.6. Анализ результатов исследования статических и динамических характеристик TO

Анализ диапазона управляемости объекта выполняется сравнением статических характеристик, полученных для диапазонов варьирования возмущения и управляющего воздействия, компенсирующего это возмущение (см. рис. 6 и рис. 7). Модуль *TO ExVB* может быть использован для анализа изменений статических и динамических свойств объекта при изменении производственных ситуаций на технологическом комплексе, которые нарушают начальное равновесное состояние объекта. Так, при переходе на другой канал подвода энергоносителя могут измениться номинальные численные значения и диапазоны варьирования характеристик энергоносителя *nom te*1 ± *dte*1, °C и *nom ge* ± *dge*, кг/с.

Для анализа такой ситуации необходимо на листе «sheet1», в столбце «Номинальные значения управляющих и возмущающих воздействий» Панели управления выделить и изменить численные значения «te1 =» и «ge =». Кнопкой «Рассчитать» запустить программу. После завершения расчета в столбце «Условия статического состояния объекта» Панели управления выделить и изменить численные значения «te2 =» и «tp2 =» на значения z1(N) и z(N) из первой строки Таблицы результатов на листе «sheet1».

Все последующие операции по исследованию статики и динамики объекта проводятся при измененном начальном равновесном состоянии, но при этом следует учитывать, что может не выполняться условие *nom tp*2 = *ust tp*2 (см. табл.1 на рис. 3).

Если разность полученного номинального значения температуры продукта на выходе и уставка регулятору (статическая ошибка) превышает допуск, установленный по условиям эксплуатации объекта (табл. 1 на рис. 3):

$$+ \delta tp2 < (nom tp2 - ust tp2) < - \delta tp2,$$

то необходимо изменить условия энергетического баланса в новом статическом состоянии объекта. Для этого необходимо на листе «*sheet*1» выделить и изменить численное значение «*ye* =» в столбце «Номинальные значения управляющих и возмущающих воздействий» Панели управления (имитация работы регулятора). Если «*tp*2 =» больше *ust tp*2 – значение «*ye* =» следует увеличить («прикрыть» клапан), если «*tp*2 =» меньше *ust tp*2 – значение «*ye* =» следует уменьшить («открыть» клапан).

Запустить программу кнопкой «Рассчитать», после завершения расчета перенести в столбец «Условия статического состояния» численные значения z(N) и z1(N) из первой строки Таблицы результатов. Если полученное численное значения «tp2 =» совпададает с ust tp2, то все численные значения параметров на Панели управления принима-

ют за начальное равновесное состояние объекта и проводят анализ статических и динамических свойств в новой производственной ситуации. Основная задача этого анализа – проверка управляемости объекта при отклонениях внешних возмущающих воздействий и установления допустимого диапазона их варьирования.

После завершения исследования объекта в измененной ситуации кнопками «Сброс» можно восстановить первоначальное состояние шаблона.

Аналогично проводится анализ характеристик объекта при изменении номинальных значений параметров по каналу подвода продукта *nom tp* $1 \pm dtp1$  и *nom gp*  $\pm dgp$ .

Изменения производственной ситуации на объекте могут приводить также к изменению численных значений конструктивных или технологических характеристик, например, переход на другой вид продукта приводит к изменению теплофизических характеристик.

Для исследования характеристик объекта в таких ситуациях необходимо на листе «*sheet*1» выделить и изменить численные значения в столбце «Конструктивные и технологические характеристики объекта» Панели управления, запустить «Рассчитать» и установить новые значения в столбце «Условия статического состояния объекта» Панели управления. Провести исследования характеристик измененного объекта и кнопками «Сброс» восстановить первоначальное состояние объекта.

По результатам анализа требований к объекту предусмотрена возможность изменения режима работы ТО с целью выпуска продукта при другой температуре на выходе, а также ограничение диапазона, в котором необходимо осуществлять перенастройку  $(tp2 = s = ust) tp2 \pm \delta tp2$  (см. табл. 1 на рис. 3).

Анализ управляемости объекта при таких изменениях режима проводится исследованием статических характеристик при измененных начальных равновесных режимах с корректировкой энергетического баланса. Модуль *TO ExVB* может быть использован в качестве шаблона для получения статических и динамических характеристик при выполнении курсовых, дипломных и самостоятельных работ по исследованию других многозвенных технологических комплексов. При выполнении такой работы необходимо осуществить следующее:  провести аппаратурно-технологический анализ технологического комплекса в соответствии с индивидуальным заданием (см. раздел 2 пособия);

– изменить содержание шаблонов ТЕХСХТО, СТРСХТО, УРАВТООС, ИНФТО;

– из прил. 3 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip] вызвать модуль *TO ExVB*, выделить ярлык «sheet1» в левом нижнем углу экрана, вызвать «Выпадающее меню», командой «Исходный текст» перейти в режим корректировки расчетной программы в среде *VB*;

– используя меню *VB*, внести в файл расчетной программы все изменения в расчетный модуль по результатам анализа комплекса;

– изменения в расчетном модуле *TO ExVB* можно предварительно подготовить, используя шаблон *MODTOB*, размещенный в прил. 1 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*], и адаптировать его в среду *VB*;

- свернуть «Исходный текст»;

– используя меню *Excel*, внести изменения в таблицы «Панели управления», откорректировать параметры режима номинального равновесного состояния комплекса;

– измененный модуль *TO ExVB* сохранить под своим именем и использовать для исследования статических и динамических характеристик технологического комплекса по индивидуальному заданию в различных производственных ситуациях.

# 3.7. Задания для практических и лабораторных работ по теме: «Анализ изменений статических и динамических характеристик объекта управления (проточного теплообменника) при изменении конструктивных характеристик и производственных ситуаций»

# Содержание работы. Оформление отчета

1. Сформировать в среде «Windows» новую рабочую папку и сохранить её под своим именем. При выполнении индивидуального задания в рабочую папку поочередно копируются, переименовываются и сохраняются программы-шаблоны из приложений 1, 2 и 3 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip].

2. По методике, изложенной в разделах 2 и 3 данного пособия, провести проверку исследования статических и динамических характеристик проточного теплообменника с характеристиками в таблицах 1–3 рис. 3 (базовый вариант).

3. В соответствии с индивидуальным заданием внести изменение начальных условий в копии приложений 1–3, находящихся в рабочей папке.

4. Проверить и при необходимости откорректировать (по энергетическому балансу) начальное равновесное состояние объекта для новых производственных ситуаций.

5. По методике раздела 3.5 провести исследование статических и динамических характеристик ТО в заданных производственных ситуациях. В «Отчет о работе» внести результаты анализа характеристик ТО для варианта индивидуального задания.

6. В файле «Отчет о работе» провести сравнительный анализ изменений статических и динамических свойств ТО при изменении производственных ситуаций.

По результатам сравнительного анализа характеристик предложить необходимые корректировки алгоритма системы автоматического управления объектом при изменённых производственных ситуациях.

# Варианты индивидуальных заданий

# <u>Вариант 0</u>.

Изменение диапазона варьирования расхода энергоносителя на входе в ТО в пределах 2 < ge < 10 кг/с (табл. 3 на рис. 3), например, при подключении (или отключении) к магистрали подачи энергоносителя дополнительных потребителей.

# <u>Вариант 1</u>.

Изменение диапазона варьирования температуры энергоносителя на входе в ТО в пределах 50 < te1 < 90 °C (табл. 3 на рис. 3), например, при переключении на другую магистраль подачи энергоносителя.

# <u>Вариант 2</u>.

Изменение диапазона варьирования расхода продукта на входе в ТО в пределах 4 < gp < 12 кг/с (табл. 3 на рис. 3), например, при переключении подачи продукта на другой предварительный накопитель.

### Вариант 3.

Изменение диапазона варьирования температуры продукта на входе в ТО в пределах 4 < tp1 < 25 °C (табл. 3 на рис. 3), например, при переключении подачи продукта на другой предварительный на-копитель.

#### Вариант 4.

Изменение номинальных значений базового варианта, например, перевод комплекса ТО на выпуск продукции при повышенной температуре на выходе  $tp2_{nom} = 40$  °C (табл. 1 на рис. 3).

#### <u>Вариант 5</u>.

Изменение номинальных значений базового варианта, например, перевод комплекса ТО на выпуск продукции при пониженной температуре на выходе  $tp2_{nom} = 25$  °C (табл. 1 на рис. 3).

#### Вариант 6.

Изменение геометрических характеристик теплообменных поверхностей, например, при ремонтных работах, до  $Vp = 2,0 \text{ m}^3$ ,  $fp = 30 \text{ m}^2$  (табл. 2 на рис. 3).

#### <u>Вариант 7</u>.

Изменение геометрических характеристик теплообменных поверхностей, например, при ремонтных работах, до  $Ve = 1,7 \text{ м}^3$ ,  $fe = 40 \text{ м}^2$  (табл. 2).

#### Вариант 8.

Изменение удельной теплоемкости, например, при нагреве другого продукта на *dcp* = 10 % (табл. 2).

#### <u>Вариант 9</u>.

Изменение коэфициентов теплопередачи *ср*, *се* на 20 %, например, при накоплении/очистке отложений на поверхности теплообмена.

# 3.8. Задания для курсовых и самостоятельных работ по теме: «Параметрический анализ и анализ производственных ситуаций при разработке системы автоматического управления (САУ)

# Содержание работы

Для технологического процесса, определенного заданием, выполнить следующее:

1. Назначить ключевые слова по теме, используя учебнометодические пособия, тематический каталог библиотеки и ресурсы интернета. провести информационно – библиографическое исследование технологического процесса, выбрать вариант аппаратурной реализации. Составить перечень используемой литературы с комментариями.

2. Оформить технологическую схему, обозначить входные и выходные каналы и характеризующие их параметры.

3. Проанализировать условия работы оборудования технологического комплекса для заданных / выбранных условий эксплуатации. Определить номинальные значения и диапазоны варьирования для входных и выходных параметров. Оформить таблицы информационного обеспечения.

4. Разработать и оформить структурно-параметрическую схему анализируемого комплекса. Определить математическое описание для каждого звена разработанной схемы. Оформить математическое описание модели для исследования характеристик комплекса.

5. Переработать шаблон расчетной программы («*MODTO*» прил. 1) для исследования статических и динамических характеристик технологического комплекса по индивидуальному заданию.

6. Провести исследования статических и динамических характеристик объекта по индивидуальному заданию в соответствии с методикой, изложенной в разделах 3.3 и 3.4 данного пособия.

7. Провести анализ характеристик объекта и предложить алгоритм системы автоматического управления для заданных/выбранных производственных ситуаций. 1. Формулировка задачи анализа комплекса по индивидуальному заданию.

2. Перечень использованной литературы с комментариями.

3. Технологическая схема и её описание, оформленные с использованием шаблона «*TEXCXTO*» [*http://de.ifmo.ru/-books/appendix\_1-10.zip*, прил. 1].

4. Структурно-параметрическая схема и её описание, оформленные с использованием шаблона «*СТРСХТО*» (там же).

5. Математическое описание модели для исследования характеристик комплекса, оформленные с использованием шаблона *«MODTO»* (там же).

6. Описание заданных / выбранных производственных ситуаций и результаты анализа информационного обеспечения, оформленные с использованием шаблона «ИНФТО» (там же).

7. Результаты анализа статических и динамических характеристик и рекомендации по разработке системы автоматизации заданного технологического комплекса.

# Варианты индивидуальных заданий

# Вариант 0.

Прямоточный трубчатый теплообменник для подогрева сливок, например, в цикле технологического процесса производства сливочного масла способом непрерывного сбивания.

# Вариант 1.

Прямоточный трубчатый теплообменник для охлаждения молока (например, при приемке) хладоносителем, поступающим из централизованной магистрали.

# Вариант 2.

Трубчатый теплообменник противотока для охлаждения молока (например, при приемке) хладоносителем, поступающим из централизованной магистрали.

# Вариант 3.

Теплообменник смешения (бойлер) для нагрева потока воды до высокой температуры паром, например, в цикле пастеризации пищевых продуктов.

# Вариант 4.

Теплообменник смешения – нагревание потока воздуха сжиганием газа (топка), например, в цикле термообработки хлебобулочных изделий.

# Вариант 5.

Шнековый поточный взбиватель пищевого продукта, например, насыщение воздухом в цикле изготовления зефирной массы.

# Вариант б.

Шнековый аппарат удаления влаги из пищевого продукта, например, в цикле изготовления творога.

# Вариант 7.

Шнековый аппарат насыщения влагой пищевого продукта, например, в цикле разведения сухого молока.

# Вариант 8.

Поточный аппарат для нормализации состава пищевого продукта, например, нормализация молока по жиру.

# <u>Вариант 9</u>.

Поточный аппарат для выделения отдельных фракций из пищевого продукта, например, в цикле изготовления сливок.

# Список литературы, рекомендованной для выполнения задания разд. 3 [1, 16-23]

Балюбаш В.А., Алёшичев С.Е. Формирование многоканальной системы стабилизации влажности сливочного масла // Сыроделие и маслоделие. 2007. № 2. С. 45–46.

Благовещенская М.М., Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами. – М.: Высш. шк., 2005. – 767 с.

Брусиловский Л.П., Вайнберг А.Я. Автоматизация технологических процессов в молочной промышленности. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищ. пром-сть, 1978. – 343 с.

**Брусиловский Л.П., Вайнберг А.Я.** АСУТП цельномолочных и молочно-консервных производств. – М.: Колос, 1993. – 363 с.

**Ивашкин Ю.А. и др.** Моделирование производственных процессов мясной и молочной промышленности / под ред. Ю.А. Ивашкина. – М.: Агропромиздат, 1987. – 232 с.

Карпин Е.Б. и др. Автоматизация технологических процессов пищевых производств / под ред. Е.Б. Карпина. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 536 с.

**Митин В.В. и др.** Автоматика и автоматизация производственных процессов в мясной и молочной промышленности. – М.: Агропромиздат, 1987. – 240 с.

Процессы и аппараты пищевых производств.: Учеб. для вузов / под ред. А. Н. Острикова. – СПб.: ГИОРД. 2012. – 616 с.

Стегаличев Ю.Г., Балюбаш В.А., Замарашкина В.Н. Технологические процессы пищевых производств. Структурнопараметрический анализ объектов управления: Учеб. пособие для ВУЗов. ГРИФ УМО. – Ростов н/Д – СПб.: Феникс, 2006. – 254 с.
#### 4. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Система автоматического регулирования (САР) образует с объектом регулирования замкнутый контур, в структурную схему которого входят как звенья, определяющие преобразование информации в многозвенном объекте, так и звенья САР, обрабатывающие информацию в процессе формирования управляющих воздействий на объект с целью, например, стабилизации регулируемого параметра на заданном уровне.

Таким образом, в структурно-параметрическую схему САР многозвенного многофакторного объекта необходимо включить звенья, формирующие измерение и обработку численных значений регулируемого параметра, обработку результатов измерения по математическим зависимостям для принятого закона регулирования, а также формирование и реализацию управляющих воздействий на объект [11].

#### 4.1. Структурно-параметрический анализ контура САР

Структурно-параметрическая схема САР содержит все результаты оформления и анализа объекта (см. раздел 2), а звенья, формирующие операции регулирования, вводятся в структурную схему объекта как дополнения [24].

Подготовленный на основе такой структурной схемы программный модуль может быть использован как для исследования статических и динамических свойств объекта, так и для исследования переходных характеристик САР в различных условиях эксплуатации объекта, а также для выбора оптимального закона регулирования и параметров настойки регулятора [25].

Подготовка, оформление и использование модуля для анализа САР исследуемого технологического комплекса рассматриваются на примере комплекса оборудования, обеспечивающего поддержание температурных режимов в производственном помещении в различных производственных ситуациях (см. «РЕГТЕМПОМ» [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip, прил. 4].

На рис. 11 представлена технологическая схема автоматизированного комплекса производственного помещения, например, склада экспедиции молокообрабатывающего предприятия. На схеме обозначены основные элементы оборудования (звенья), входящие в структурно-параметрическую схему модели объекта, направление потоков, формирующих энергетический обмен, обозначение параметров на входе и выходе каждого звена.

Основной задачей управления этим объектом является стабилизация температуры воздуха в объёме помещения в заданных пределах, например,  $t = t_{ycr} = 5 \pm 0.5$  °C при любых возможных для данного объекта производственных ситуациях.

В качестве управляющего воздействия на объект предлагается канал управления подачей энергоносителя на входе в радиатор *ye*±*dye*. На схеме выделены основные возмущающие воздействия:

– давление на входе в магистраль энергоносителя  $pe\pm dpe$ ;

– температура энергоносителя на входе  $te \pm dte$ ;

– масса и температура внесённых тепловыделяющих предметов  $mp \pm dmp$ ,  $tp \pm dtp$ ;

– температура наружного воздуха  $tN \pm dtN$ .

Шаблон технологической схемы «РИС. 12» реализован в прил. 4 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip].

Для комплексной оценки степени влияния возмущений и управляющего воздействия на температуру воздуха в помещении, определения диапазона управляемости объекта, выбора закона регулирования и параметров настройки регулятора необходимо моделировать изменение статических и динамических характеристик объекта в различных производственных ситуациях.

Математическое описание модели объекта, позволяющее имитировать изменение состояния объекта при варьировании возмущающих и управляющих воздействий на объект, а также при изменении производственных ситуаций выполнено в виде <u>линеаризованных</u> дифференциальных и алгебраических уравнений, определяющих функцию преобразования информации в каждом звене при <u>ограниченном диапазоне</u> варьирования переменных [26].

Математическое описание звеньев определяют аналитически из уравнений энергетического и/или материального баланса либо экспериментально на основе исследований на объекте [10].



Рис. 11. Технологическая схема производственного помещения: 1–7 – звенья объекта управления

На схеме обозначено:

1 – магистраль подвода хладоносителя к объекту объёма *vm* (инерционное звено), *pe±dpe* – давление на входе в магистраль энергоносителя; *ge* – максимальный расход энергоносителя из магистрали при давлении *pe± dpe*;

2 – клапан, регулирующий расход энергоносителя через радиатор (безынерционное звено), *ye±dye* – команда на закрытие клапана подачи энергоносителя, *gy* – расход энергоносителя на выходе из клапана;

3 – трубопровод объёма *vt* (звено запаздывания), передающий энергоноситель от регулирующего клапана к радиатору, *gr* – расход энергоносителя на входе в радиатор;

4 – радиатор охлаждения объёмом *vr* (инерционное звено) с поверхностью теплообмена *fr*, *qr* – количество энергии, переходящей из воздушного объёма помещения через поверхность радиатора в единицу времени, *te±dte* – температура энергоносителя, поступающего в радиатор;

5 – упаковки продукта, внесённые в помещение (безынерционное звено),  $mp \pm dmp$ ,  $tp \pm dtp$  – масса и температура предметов, внесённых в помещение, qp – количество энергии, переходящей в воздушный объём помещения через поверхность предметов fp в единицу времени;

6 – стена (ограждение), имеющая объём vs и поверхность теплообмена fs (инерционное звено),  $tN \pm dtN$  – изменения температуры наружного воздуха, влияющие на интенсивность теплопотерь, qs – количество энергии, поступающей в воздушный объём помещения через поверхность стены в единицу времени;

7 - объём воздуха в помещении vv (инерционное звено),qs+qp-qr – изменение количества энергии в воздушном объёме помещения в единицу времени, <math>t – температура воздуха в помещении.

В шаблоне *REGXOL*, размещенном в прил. 4, приведена расчетная программа для исследования изменений характеристик комплекса стабилизации температуры воздуха в производственном помещении с заданными характеристиками звеньев, формирующих энергетические потоки.

В шаблоне *REGXOL* представлен пример программы подготовленной для исследования комплекса стабилизации температуры, работающего в теплое время года. Для исследования характеристик объекта, а также контура CAP по методу численного интегрирования в расчетный модуль *REGXOL* кроме уравнений звеньев модели внесены уравнения, имитирующие работу звеньев контура CAP.

Структурно-параметрическая схема расчетного модуля для исследования работы САР комплекса стабилизации температуры в производственном помещении представлена на рис. 12.

Шаблон структурно-параметрической схемы САР в приложении 4 – «РИС 13». Математические описания звеньев контура САР размещены в прил. 4 – «РЕГТЕМПОМ» [http://de.ifmo.ru/-books/appendix\_1-10.zip].

Начальное статическое состояние объекта определяется энергетическим балансом энергопотоков, входящих и уходящих из объема воздушной среды помещения, qp - qr + qs - qt = 0. При этом обеспечивается заданное численное значение выходного параметра  $t = t_{yct} \pm \Delta t$ . В расчетном модуле *REGXOL* используются следующие математические описания характеристик звеньев, входящих в структуру объекта (см. рис. 12).



Рис. 12. Структурная схема объекта управления (помещения) и контура регулирования температуры воздуха в помещении: 1–7 – звенья объекта управления

Звено 1. Определяет функцию ge = F(pe) – изменение подачи энергоносителя ge, м<sup>3</sup>/с из магистрали энергоснабжения через регулирующий клапан системы управления при изменении давления pe, кПа на входе в магистраль. Звено инерционное, уравнение динамики звена:

$$T1\frac{dge}{d\tau} + ge = k1 \cdot pe^{0.5}$$

Постоянная времени звена T1, с, определяется, главным образом, объёмом магистрали энергоподачи vm, м<sup>3</sup>. Коэффициент передачи звена k1, м<sup>3</sup>/(с·кПа) определяется гидравлическими сопротивлениями магистрали. Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования, уравнение звена преобразуется к виду:

$$dge(i) = (k1(pe + dpe)^{0.5}) - ge(i - 1) W / T1;$$
  
 $ge = ge + dge(i),$ 

где i – номер шага при интегрировании, W – интервал интегрирования, с;  $\pm dpe$  – отклонение возмущающего воздействия от номинального значения, кПа.

**Звено 2.** Реализует функцию gy = f(ge, yp) – изменение расхода энергоносителя через радиатор охлаждения помещения при изменении расхода энергоносителя из магистрали *ge*, м<sup>3</sup>/с или величины закрытия регулирующего клапана *уp*, % ХРО. Звено безынерционное, при линейной характеристике клапана, звено реализует зависимость:

$$gy = ge - k2 \cdot yp.$$

Коэффициент усиления звена  $k^2 = ge / 100$ , если  $yp = 0 \dots 100$ , % ХРО. Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования уравнение звена преобразуется к виду:

$$gy(i) = ge (1 - k2 (yp + dyp(i))),$$

где  $\pm dyp(i)$  – отклонение управляющего воздействия от номинального значения, % ХРО.

Звено 3. Определяет транспортное запаздывание при передаче энергоносителя от регулирующего клапана к радиатору отопления / охлаждения в помещении. Уравнение звена реализует задержку по времени *tz*, с, при передаче сигнала:

 $gr[\tau + \tau z] = gy[\tau],$ 

где  $gr[\tau + \tau z]$  – расход энергоносителя через радиатор в момент времени  $[\tau + tz]$ ,  $m^3/c$ ;  $gy[\tau]$  – расход энергоносителя через клапан в момент времени  $[\tau]$ ,  $m^3/c$ .

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования, уравнение звена преобразуется к виду:

$$gr = gy(i - W2),$$

где  $W2 = \tau z / W - число интервалов интегрирования, формирующих задержку по времени.$ 

Звено 4. Реализует функцию qr = F(gr, te, t) – изменение количества энергии qr, кДж/с, отдаваемой воздуху в помещении через поверхность радиатора при изменении расхода энергоносителя gr, м<sup>3</sup>/с, температуры энергоносителя te, °С или температуры в помещении t, °С. Звено инерционное, уравнение динамики звена имеет вид:

$$T4\frac{dqr}{d\tau} + qr = k_{4.1} \cdot gr^{0.8} + k_{4.2} \cdot te - k_{4.3} \cdot t.$$

Постоянная времени звена *T*4, с, определяется объёмом радиатора *vr*, м<sup>3</sup>.

Коэффициенты передачи звена  $k_{4.1}$ , кДж/м<sup>3</sup>,  $k_{4.2}$ , кДж/(с·град),  $k_{4.3}$ , кДж/(с·град) определяются теплотехническими характеристиками среды и поверхностью теплообмена радиатора fr, м<sup>2</sup>.

Коэффициенты уравнения могут быть получены из уравнений теплового баланса количества энергии, ушедшей в воздушную среду

через поверхность радиатора, и количества энергии, потерянной энергоносителем при прохождении через радиатор.

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования уравнение звена преобразуется к виду:

$$dqr(i) = (k_{4.1} (gr)^{0.8}) - k_{4.2} (te + dte) + k_{4.3} \cdot t - qr) W / T4;$$
$$qr = qr + dqr(i),$$

где  $\pm dte$  – отклонение возмущающего воздействия он номинального значения, °С.

Звено 5. Реализует функцию qp = f(mp, tp, t) – изменение количества энергии qp и qm, кДж/с, поступающей в воздух помещения из тепловыделяющих предметов, находящихся в помещении при изменении массы предметов mp, кг, или температуры вносимых предметов tp, °C, или температуры в помещении t, °C.

Звено инерционное, уравнения динамики звена имеют вид:

$$T5\frac{dqp}{d\tau} + qp = k_{5.1} \cdot mp + k_{5.2} \cdot tp - k_{5.3} \cdot t,$$
$$T0\frac{dqm}{d\tau} + qm = k_{5.2} \cdot dtp - k_{5.4} \cdot (tp - t).$$

Постоянные времени *T*5 и *T*0, с и коэффициенты передачи звена  $k_{5.1}$ , кДж/(с·кг),  $k_{5.2}$ ,  $k_{5.3}$  и  $k_{5.4}$ , кДж/(с·°С) определяются поверхностью теплообмена *fm*, м<sup>2</sup>, объемом предметов, *vm*, м<sup>3</sup>, а также теплотехническими характеристиками среды.

Для исследования изменения параметров объекта по методу численного интегрирования уравнения звена преобразуются к виду:

$$dqp(i) = (k_{5.1} (mp + dmp) + k_{5.2} \cdot tp - k_{5.3} \cdot t - qp) W/T5$$
$$qp = qp + dqp(i),$$
$$dqm(i) = (k_{5.2} \cdot dtp - k_{5.4} (tp - 1) - qm(i-1)) W/T0,$$
$$qm = qm + dqm(i),$$

где  $\pm dmp$ ,  $k_{5.4} + dtp$  — отклонение возмущающих воздействий от номинальных значений.

Звено 6. Реализует функцию qs = F(tN, t) – изменение количества энергии qs, кДж/с, поступающей в воздух помещения через стены при изменении температуры наружного воздуха tN, °C или температуры в помещении t, °C.

Звено инерционное, уравнение динамики звена имеет вид:

$$T6\frac{dqs}{d\tau} + qs = k_{6.1} \cdot t + k_{6.2} \cdot tn \,.$$

Постоянная времени звена *T*6, с, определяется объёмом *vs*, м<sup>3</sup> и массой стены.

Коэффициенты передачи звена  $k_{6.1}$ , кДж/(с·град),  $k_{6.2}$ , кДж/(с·град) определяются теплотехническими характеристиками среды и поверхностью теплообмена стены fs, м<sup>2</sup>.

Коэффициенты уравнения могут быть получены из уравнений теплового баланса количества энергии, пришедшей в воздушную среду через поверхность стен помещения, и количества энергии, принятой воздушной средой помещения при контакте с поверхностью стены.

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования уравнение звена преобразуется к виду:

$$dqs(i) = (-(k_{6.1} \cdot t + k_{6.2} \ (tN + dtN)) - qs) W / T6,$$
  
 $qs = qs + dqs(i),$ 

где  $\pm dtN$  – отклонение возмущающего воздействия от номинального значения, °С.

Звено 7. Реализует функцию t = F(qr, qp, qs) – изменение температуры воздуха в помещении t, °С при изменении количества энергии qr, кДж/с, поступающей в воздух через поверхность радиатора, или количества энергии qp, кДж/с, поступающей в воздух из тепловыделяющих предметов, или количества энергии qs, кДж/с, уходящей из воздуха помещения через стены. Звено инерционное, уравнение динамики звена:

$$T7\frac{dt}{d\tau} + t = k_{7.1}(-qr + qp + qs + qm).$$

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования уравнение звена преобразуется к виду:

$$dt(i) = (k_{7.1} (-qr + qp + qs + qm) - t) W / T7,$$
  
$$t = t + dt(i).$$

Схема, представленная на рис. 12, содержит также звенья, моделирующие работу контура регулирования.

# Математическое описание звеньев, формирующих контур регулирования

Звено ИЛИ. Обеспечивает переключение на различные законы регулирования:

– при установке команды k = 0 работает функциональный (П, ПИ, ПД, ПИД) регулятор (изменение управляющего воздействия *dyp* формируется сигналом *yf*);

- при k = 1 работает позиционный (Пз) регулятор (изменение управляющего воздействия *dyp* формируется сигналом *ypr*).

Звено УР. Формирует величину открытия регулирующего клапана в начальном статическом режиме: yp = 50 % ХРО (возможность управлять процессом при положительных и отрицательных от-клонениях параметра).

Звено СО. Формирует сигнал ошибки – отклонение фактического значения регулируемого параметра t, °С от уставки (задания) tp, °С:

$$xp(i) = zt - t.$$

# Звенья, формирующие функциональные законы регулирования

Звено Д. Формирует дифференциальную составляющую в уравнении регулятора. Уравнение, реализуемое данным звеном, имеет вид:

$$yp1 = kp \cdot T_p \, \frac{dxp}{d\tau},$$

где *ур*1 – составляющая управляющего воздействия на регулирующий клапан, пропорциональная скорости изменения регулируемого параметра, % ХРО; *kp* – коэффициент усиления регулятора (параметр настройки регулятора), % ХРО/град; *Tp* – время предварения (постоянная времени звена дифференцирования – параметр настройки регулятора), с.

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования уравнение звена преобразуется к виду:

$$yp1(i) = kp \cdot Tp \cdot xp(i) / W.$$

Звено И. Формирует интегральную составляющую в уравнении регулятора. Уравнение, реализуемое данным звеном, имеет вид:

$$T_s \frac{dyp2}{d\tau} = kp \cdot xp,$$

где dyp2 – приращение составляющей управляющего воздействия на регулирующий клапан, формируемое интегрирующим звеном регулятора за промежуток времени  $d\tau$ , % ХРО; kp – коэффициент усиления регулятора (параметр настройки регулятора), % ХРО/град; Ts – время интегрирования (постоянная времени звена интегрирования – параметр настройки регулятора), с.

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования уравнение звена преобразуется к виду:

$$dyp2(i) = kp \cdot W \cdot xp(i) / Ts,$$
  
 $yp2 = yp2 + dyp2(i).$ 

**Звено П.** Формирует пропорциональную составляющую в уравнении регулятора *ур*3. Уравнение, реализуемое звеном, имеет вид:

$$yp3 = kp \cdot xp.$$

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования уравнение звена преобразуется к виду:

$$dyp3(i) = kp \cdot xp(i),$$

где *dyp*3(*i*) – приращение составляющей управляющего воздействия на регулирующий клапан, формируемое пропорциональным звеном регулятора за один шаг интегрирования, % ХРО.

**Звено РФ.** Формирует суммарное управляющее воздействие на клапан от всех звеньев функционального регулятора:

$$yf = yp1 + yp2 + yp3.$$

При формировании управляющего воздействия от регулятора на клапан вводятся ограничения на диапазон перемещения регулирующего органа.

Если  $yp1 + yp2 + yp3 \ge 40$  % XPO, то устанавливается yf = 40 % XPO, что ограничивает перемещение клапана на закрытие до 90 % XPO.

Если  $yp1 + yp2 + yp3 \le -40$  % ХРО, то устанавливается yf = -40 % ХРО, что ограничивает перемещение клапана на открытие до 10 % ХРО.

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования формируется приращение управляющего воздействия dyp(i) = yf.

Программный блок, реализующий эти условия, имеет вид:

 $IF yp1(i) + yp2 + dyp3(i) \ge 40 THEN$ dyp(i) = 40 $ELSE IF yp1(i) + yp2 + dyp3(i) \le -40 THEN$  dyp(i) = -40 ELSE dyp(i) = yp1(i) + yp2 + dyp3(i)END IF

Звенья, формирующие позиционный закон регулирования

Звено ПЗ1. Формирует управляющие воздействие на объект:

dyp = yl, % XPO – при переходе сигналом ошибки через верхний предел, заданный при настройке позиционного регулятора a1, °C.

Звено ПЗ2. Формирует управляющие воздействие на объект:

dyp = yh, % XPO – при переходе сигналом ошибки через нижний предел, заданный при настройке позиционного регулятора a2, °C.

Звено ЛЗ1. Формирует логическое условие:

Если сигнал ошибки возвращается в заданный диапазон (a2 < xp < a1), то установленное в предыдущем цикле интегрирования значение *dyp* сохраняется, при этом реализуется характеристика, представленная на рис 13.



Рис. 13. Характеристика позиционного регулятора

При настройке регулятора задают численные значения:

- уставки (задания) регулятору *tp*, для (xp = t - tp = 0), °C;

- верхнего и нижнего пределов переключения *a*1 и *a*2, °C;

– величины перемещения регулирующего клапана при уменьшении и увеличении подачи энергоносителя yl и yh (регулирование неполным закрытием и неполным открытием регулирующего органа), % ХРО.

Для исследования изменения параметров объекта во времени по методу численного интегрирования функция, реализуемая ПЗ регулятором, формируется в виде логических условий:

IF xp(i) > = a1 THEN dyp(i) = y1  $ELSE IF xp(i) \le a2 THEN$  dyp(i) = yh ELSE dyp(i) = dyp(i - 1)END IF

# 4.2. Исследование переходных характеристик качественных параметров автоматизированного комплекса при изменении возмущений и производственных ситуаций

Исследования изменений статических состояний в объекте и в замкнутом контуре САР, а также переходных процессов при переходе в новое равновесное состояние под управлением САР проводят, используя специальную расчетную программу. В прил. 4 размещен шаблон программного модуля *REGXOL*, работающий в среде *QBAS*, подготовленный для исследования характеристик системы регулирования температуры в производственном помещении [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*].

Оформление модуля и алгоритм работы с ним аналогичны описанию работы шаблона *MODTO* (см. раздел 3). Модуль подготовлен для исследования работы объекта в заданном диапазоне варьирования возмущающих воздействий на объект. Это условие определяет выбор номинальных численных значений переменных параметров в начальном равновесном состоянии объекта, а также выбор численных значений коэффициентов передачи звеньев объекта (кусочнолинейная аппроксимация статических характеристик вблизи номинальных численных значений параметров) [27].

В программном модуле *REGXOL* реализована задача исследования системы стабилизации температуры воздуха в помещении в летний период. Энергоноситель – хладоноситель. Статические и динамические характеристики объекта заданы численными значениями коэффициентов уравнений звеньев модели (см. рис. 12 и раздел «Задание характеристик звеньев объекта» в *REGXOL*).

Параметры начального равновесного состояния объекта определены для стабилизации температуры воздуха на значении  $t_{ycr} = 5 \pm 0.5$  °C. При этом:

pe = 6,5 атм, диапазон варьирования  $5 \div 12,5$  атм; yp = 50 %ХРО, диапазон варьирования  $10 \div 90$  % ХРО; te = -20 °С, диапазон варьирования  $-10 \div -30$  °С; mp = 500 кг, диапазон варьирования  $100 \div 900$  кг;  $tp = t_{nom} = 5,18$  °С, диапазон варьирования  $-3 \div +10$  °С; tN = 20 °С, диапазон варьирования  $15 \div 25$  °С;  $t_{nom} = 5,18$  °С.

Для работы с модулем *REGXOL* необходимо:

1. Вызвать с диска на рабочий стол *REGXOL* из прил. 4 и сохранить под своим именем.

Одновременно на диске «С» открыть папку «REZULTAT» (см. прил. 2).

2. С использованием ярлыка «*REGXOL*» открыть расчетный файл.

3. Командой «Пуск» запустить программу и проверить состояние начального равновесного режима (см. раздел 3 пособия).

4. В файле *REGXOL* в строке «Формирование возмущений» внести отклонение исследуемого возмущающего воздействия, включить или отключить регулятор, задать параметры настройки регулятора.

5. Из меню «*QBasic*» командой «Пуск» запустить программу. По запросу из программы переслать таблицу результатов в папку «*REZULTAT*» в виде текстового файла «*reghol*».

6. Закрыть «QBasic».

7. Вызвать «*Excel*», открыть на диске «*C*», с условием «Все файлы», папку «*REZULTAT*» и затем текстовый файл «*reghol*» в «Редакторе текстов» (см. «АЛГОРИТМ » в прил. 2), преобразовать, используя «Редактор текстов», таблицу результатов «*reghol*» в лист «*Excel*».

8. На листе «*Excel*» оформить таблицу результатов в числовой форме с необходимой размерностью числовых значений.

9. Используя «Мастер диаграмм» из меню «*Excel*», оформить графическую форму переходной характеристики на листе с таблицей результатов.

10. Сохранить лист «*Excel*» под своим именем, например, «РИС.16» и передать для дальнейшего оформления и анализа в папку «ГРАФ» прил. 2 (см. рис., 14, 15, 16).

#### 4.3. Анализ результатов исследования качественных характеристик САР температуры в производственном помещении

На рис. 14, 15, 16 представлены примеры оформления переходных характеристик, полученных при исследовании САР с использованием считающей программы *REGXOL*. Шаблоны рисунков сохранены в папке «ГРАФ» прил. 2. Анализ результатов проводят в среде «*Excel*».

При анализе качественных характеристик САР используется терминология и обозначения по табл. 1 на рис. 3.

Для анализа результатов расчета переходных характеристик на шаблонах рис. 14, 15, 16 в режиме «Формат данных» выделить характерные точки на графике и зафиксировать возникающие при этом числовые значения регулируемого параметра – температуры воздуха в помещении t(W), °C и момента времени  $\tau(W)$ , с, при котором эти значения были достигнуты.



Рис. 14. Переходная характеристика объекта (регулятор отключен) Возмущение *dpe* = 6 атм



Рис. 15. Переходная характеристика при работе САР стабилизации температуры в помещении. Возмущение *dpe* = 6 атм Уставки ПИД-регулятора – *kp* = 3, *tp* = 2, *ts* = 300, *zt* = 5,18

Анализ рис. 14 (объект без регулятора) показал, что при скачкообразном возмущении – изменении давления в магистрали подачи энергоносителя, от значения pe(W1) = 6 атм до значения pe(W1+1) = 12 атм, температура в помещении изменится от значения t(W1) = 5,18 °C ( $\tau(W1) = 50$  с) до нового установившегося значения t(N) = 2,45 °C ( $\tau(N) = 600$  с). Таким образом, время стабилизации объекта на новом режиме  $\tau = \tau(N) - \tau(W1) = 600 - 50 = 550$  с.

Коэффициент передачи объекта

$$K_o = \frac{t(N) - (w1)}{dpe} = \frac{2,45 - 5,18}{6} = -0,45 \text{ °C/atm.}$$

При переходе объекта в новое установившееся состояние наблюдается значительный динамический заброс в сторону снижения температуры в помещении (вызвано влиянием звена 6 (теплообмен через стены), включенного в структуру объекта по схеме обратной связи). Максимальное отклонение при забросе до  $t_{min} = -0,25$  °C в момент времени  $\tau_{min} = 135$  с. Возврат к стабильному состоянию t(8) = 2,35 °C в момент времени  $\tau(8) = 350$  с. Таким образом, величина динамического заброса

$$\delta t = t_{\min} - t(8) = -0.25 - 2.35 = -2.6$$
 °C.

Продолжительность заброса

 $\delta \tau = \tau(8) - \tau(W1) = 350 - 50 = 300 \text{ c.}$ 

Анализ рис. 15. Переходная характеристика при работе САР стабилизации температуры в помещении. Возмущение – изменение давления в магистрали подачи энергоносителя, от значения pe(W1) = 6 атм до значения pe(W1+1) = 12 атм, в момент времени  $\tau(W1) = 50$  с. Включен ПИД-регулятор с настройкой zt = 5,18 °C, kp = 3,  $\tau p = 2$ , ts = 300.

В результате анализа переходной характеристики рис. 15 установлено (см. обозначение по табл. 1 на рис. 3) следующее.

Значения регулируемого параметра:

– номинальные t(W1) = 5,18 °C ( $\tau(W1) = 50$  с);

– в новом равновесном режиме t(N) = 5,16 °C ( $\tau(N) = 500$  с).

Динамический заброс до t(A1) = 3,71 °C ( $\tau(A1) = 92$  с).

Таким образом, время стабилизации контура САР (время регулирования)

$$\tau_p = \tau(N) - \tau(W1) = 500 - 50 = 450 \text{ c.}$$

Процесс стабилизации – колебательный, затухающий. Параметры колебаний:

$$t(A2) = 4,33$$
 °C ( $\tau(A2) = 152$  c),  
 $t(A3) = 4,69$  °C ( $\tau(A3) = 215$  c).

Коэффициент затухания

$$\xi = \frac{|t(A3) - t(N)|}{|T(A2) - T(N)|} 100 = \frac{4,69 - 5,15}{4,33 - 5,15} 100 = 58 \%.$$

Анализ рис. 16. Переходная характеристика при работе САР стабилизации температуры в помещении. Возмущение – изменение массы предметов, внесенных в помещение, dmp = 400 кг в момент времени  $\tau$  (W1) = 50 с. Включен ПЗ-регулятор с настройкой zt = 5,18; a1 = 0,5; a2 = -0,5; yh = 20; yl = -20.

В результате анализа переходной характеристики рис.16 установлено:

 – уставка регулятору (номинальное значение регулируемой величины)

$$Zt = t(W1) = 5,18 \,^{\circ}\text{C};$$

 отклонение регулируемого параметра от номинала в установившемся колебательном режиме:

$$t(max) = 6,58 \ ^{\circ}C \ (\tau(max) = 364 \ c),$$

$$t(min) = 2,08$$
 °C ( $\tau(min) = 394$  c).

«Статическая» ошибка при работе ПЗ-регулятора:

$$+\Delta t = t(max) - t(W1) = 6,58 - 5,18 = 1,4 \text{ °C},$$
$$-\Delta t = t(W1) - t(min) = 5,18 - 2,08 = 3,1 \text{ °C}.$$



Рис. 16. Переходная характеристика объекта при работе ПЗ-регулятора Возмущение dmp = 400 кг Уставка регулятора – zt = 5,18, a1 = 0,5, a2 = -0,5, yh = 20, yl = -20

Время цикла установившихся колебаний:

 $\tau_{\rm K} = 2(\tau(min) - \tau(max)) = 2(394 - 364) = 60$  c.

Момент выхода на установившийся колебательный режим т(ст) = 180 с.

Продолжительность динамического заброса

$$\varsigma \tau = \tau(cT) - \tau(W1) = 180 - 50 = 130 c.$$

#### Изменение производственной ситуации

В прил. 4 [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*] размещен шаблон программы «*REGPOM*», в котором реализована задача исследования системы стабилизации температуры в рабочем производственном помещении на уровне  $t_{ycr} = 18 \pm 1$  °C, в холодное время, энергоноситель – горячая вода.

В этом случае расчетная программа содержит другую реализацию звеньев модели объекта (см. раздел «Задание характеристик звеньев в «*REGPOM*»).

Параметры начального равновесного состояния при этом:

pe = 8 диапазон варьирования 5 ÷ 12;

yp = 50 диапазон варьирования  $10 \div 90$ ;

te = 50 диапазон варьирования  $20 \div 80$ ;

mp = 500 диапазон варьирования  $100 \div 900$ ;

tN = -15 диапазон варьирования  $-20 \div -10$ ;

 $t_{\rm yct} = 17,7 \,{}^{\rm o}{\rm C}.$ 

На рис. 17, 18, 19 приведены примеры переходных характеристик для объекта без регулятора и для контура САР, полученных с использованием расчетной программы «*REGPOM*». Характеристики – реакция контура на возмущение dpe = -3 атм. Шаблоны характеристик оформлены в форме листов в «*Excel*» и сохранены в папке «ГРАФ» [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*, прил. 2].



Рис. 17. Переходная характеристика объекта (регулятор отключён) Возмущение *dpe* = - 3 атм



Рис. 18. Переходная характеристика при работе САР стабилизации температуры в помещении. Возмущение *dpe* = – 3 атм Уставки ПИД-регулятора – *kp* = 2, *tp* = 1, *ts* = 1, *zt* = 17,7





Шаблоны рис. 17, 18, 19 могут быть использованы для проведения самостоятельной работы по теме «Анализ систем автоматического регулирования технологических комплексов». Алгоритм анализа аналогичен выполненному на шаблонах листов 14, 15, 16.

#### Программа «reg.xol VBEx»

В прил. 4 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip] размещен шаблон программы «reg.xol VBEx», работающий в среде Excel. В этом модуле расчетная программа REGXOL переведена в среду Visual Basic [15], что позволяет проводить весь цикл исследования переходных характеристик объекта и САР в одном файле. Модуль «reg.xol VBEx» может быть использован как стенд для проведения лабораторных работ по анализу качественных показателей работы САР при различных настройках контура регулирования.

Модуль «*reg.xol VBEx*» может использоваться как шаблон при подготовке и исследовании САР других объектов. Все операции по корректировке считающей программы при этом выполняются через меню *VB* (не русифицировано!).

Появляется также возможность дополнительного развития программы, например, вводом операций «Поиск решения» для выбора оптимальной (по заданному критерию) настройки уставок регулятора.

Алгоритм использования модуля «*reg.xol VBEx*» аналогичен описанию работы с модулем «*TO VBEx*» (см. раздел 3.5 и прил. 3).

Для работы с модулем «reg.xol VBEx» необходимо:

1. Скопировать программу на рабочий стол и сохранить под своим именем.

2. Открыть программу (макросы не отключать) на экране «Лист1» (*sheet*1) с результатами предыдущих расчетов (аналогично «*sheet*1», см. рис. 9).

3. Щелкнуть ярлык «VB» в меню «Excel» или выделить ярлык «Лист1», вызвать «выпадающее меню» и щелкнуть «Исходный текст».

На экране – Visual Basic Лист1 (Code), в среде которого оформлен файл расчетной программы, подготовленной для исследования характеристик производственного помещения, а также системы регулирования температуры в помещении (аналог программы Regxol)

4. В соответствии с комментариями в программе внести численные значения изменения исследуемого возмущения, тип и уставки настройки регулятора.

5. В меню VB командой RuN... F5 запустить программу.

6. Закрыть лист ... VB, используя меню VB. На экран выводится «Лист1» с результатами исследования переходной характеристики в табличной форме.

7. Щелкнуть ярлык «граф» внизу экрана. На экране отображается диаграмма переходной характеристики для исследуемого случая.

8. Лист «граф» как лист «*Excel*» скопировать в отчет и сохранить под своим именем для дальнейшей обработки и анализа качества работы регулятора.

Модуль «*reg.xol VBEx*» реализован для исследования характеристик САР в производственном помещении, например, склада экспедиции молочного комбината, в котором необходимо поддерживать температуру воздуха вблизи  $t_{nom} = 5,5$  °C в летний период времени (энергоноситель – хладоноситель из магистрали холодильной установки). Параметры начального равновесного состояния объекта (см. рис. 11 и 12) при этом:

pe = 5,5 атм, диапазон варьирования  $2,5 \div 8,0$  атм;

yp = 50 %XPO, диапазон варьирования 10÷90 % XPO;

te = -18 °C, диапазон варьирования  $-10 \div -25$  °C;

*mp* = 500 кг, диапазон варьирования 100÷900 кг;

tN = 20 °С, диапазон варьирования  $12 \div 30$  °С.

На рис. 20, 21, 22 приведены примеры результатов исследования переходных характеристик системы регулирования температуры такого объекта с использованием модуля «*reg.xol VBEx*». На рис. 20 дана графическая форма характеристики объекта без регулятора, возмущение dmp = 400 кг. На рис. 21 – характеристика контура при работе ПИД-регулятора. Возмущение dmp = 400 кг. Уставки регулятора – kp = 2, tp = 2,  $\tau_3 = 250$ , zt = 5,5. На рис. 22 – характеристики контура при работе ПЗ регулятора. Уставки регулятора – zt = 5,5, a1 = 0,5, a2 = -0,5, yh = 20, yl = -20.

В прил. 4 [http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip] – шаблоны «РИС 21», «РИС 22» и «РИС 23». В шаблонах представлены результаты в графической и табличной форме. Эти шаблоны могут быть использованы для проведения самостоятельных работ по теме (см. анализ переходных характеристик на рис. 15, 16).



Рис. 20. «*reg.pom VBEx*». Лист «Диаграмма» Переходная характеристика объекта (регулятор отключен) Возмущение *dmp* = 400 кг



Рис. 21. «*reg.pom VBEx*». Лист «Диаграмма». Переходная характеристика объекта при работе ПИД-регулятора. Возмущение *dmp* = 400 кг Уставки регулятора – *kp* = 2, *tp* = 2, *tz* = 250, *zt* = 5,5



Рис. 22. «*reg.pom VBEx*». Лист «Диаграмма». Переходная характеристика объекта при работе ПЗ-регулятора. Возмущение *dpe* = 3 атм Уставки регулятора – *zt* = 5,5, *a*1 = 0,5, *a*2 = -0,5, *yh* = 20, *yl* = -20

#### 4.4. Лабораторная работа

#### Сравнительный анализ качества работы САР при различных настройках контура регулирования температуры воздуха в производственном помещении

Работа выполняется на программном модуле «*regxol VBEx*» [*http://de.ifmo.ru/--books/appendix\_1-10.zip*, прил. 4]. Описание в разделе 4.

При выполнении данной лабораторной работы предполагается знакомство учащегося с основными принципами формирования и использования систем автоматического регулирования [11].

В соответствии с индивидуальным заданием анализ проводится для одной из производственных ситуаций заданной параметрами начального равновесного состояния объекта. Анализируется переходная характеристика САР, как реакция на изменение возмущающего воздействия по заданному каналу.

Сравнительный анализ качества регулирования проводится по критериям, рассмотренным в разделе 2.3.

#### Содержание работы

1. Скопировать на рабочий стол модуль «*regxol VBEx*» и сохранить под своим именем.

2. Открыть «*regxol*». На экране «лист 1» с результатами предыдущих расчетов. Щелкнуть ярлык «*VB*» в меню «*Excel*».

3. На экран выводится текст считающей программы, оформленный на листе *Visual Basic*. В текст программы вносят изменения численных значений характеристик звеньев и начальных условий статического равновесия, если это указано в индивидуальном задании.

4. Ключом включения регулятора («К…») установить закон регулирования и ввести численные значения параметров настройки регулятора по заданию.

5. В разделе «формирование возмущений» ввести <u>численное</u> значение отклонения возмущения в соответствии с индивидуальным заданием.

6. В меню  $VB \ll RuN$ » запустить расчет переходной характеристики  $\ll RuN$  Subjt ser Form». После окончания расчета VB закрыть  $\ll^*$ ».

7. На экран выводится «Лист 1» с результатами расчета переходной характеристики САР в виде таблицы (см. рис. 9).

8. Ярлыком «Диаграмма» вызвать на экран диаграмму полученной переходной характеристики САР.

Сохранить диаграмму как лист *Excel* под своим именем в папку «ГРАФ» (прил. 2), для дальнейшей обработки и анализа.

9. Повторить операции 3...8 для следующего варианта закона регулирования и параметров настройки регулятора в соответствии с индивидуальным заданием. Внести переходные характеристики в папку «ГРАФ».

10. Используя процедуру «Диаграмма», откорректировать изображение переходных характеристик к виду, удобному для анализа (см. рис. 14–16). 11. По обработанным диаграммам оценить и сравнить основные показатели качества работы САР исследованных вариантов. Анализ проводится по алгоритму раздела 4.2 с учетом обозначений в табл. 1 и 3 на рис. 3.

#### Варианты заданий по работе

1. Провести анализ изменения показателей качества работы САР контура регулирования температуры воздуха в помещении при изменении настройки установок ПИД-регулятора. Базовый вариант переходной характеристики – на рис. 21.

1.1. Анализируются переходные характеристики при ступенчатом изменении численного значения постоянной времени интегрирования «*ts* =». Остальные уставки регулятора сохраняются.

Диапазон варьирования значений *ts* должен обеспечивать изменение вида переходной характеристики от апериодического до потери устойчивости (расходящиеся колебания).

1.2. Анализируются переходные характеристики при ступенчатом изменении численного значения постоянной времени предварения «tp =». Остальные уставки регулятора сохраняются. Диапазон варьирования значения «tp =» от нуля до потери устойчивости переходного процесса.

1.3. Анализируются переходные характеристики при ступенчатом изменении численного значения коэффициента регулирования «кр =». Остальные уставки регулятора сохраняются. Диапазон варьирования «кр=» от кр=0,1 до установления устойчивых периодических колебаний в переходном процессе.

2. Провести анализ изменений показателей качества САР контура регулирования воздуха в помещении при переходе на другой закон регулирования.

Базовый вариант переходной характеристики – на рис. 21 (ПИД-регулятор).

При определении переходных характеристик анализируемых вариантов в расчетной программе «*regxol VBEx*» изменяют параметры настройки функционального регулятора последовательно на рисунках:

- рис. 21 – ПИД-регулятор (уставки регулятора – kp = 2, tp = 2, tr = 2, tr = 2, tr = 250, zt = 5,5);

- рис. 22 – ПЗ-регулятор (уставки регулятора – zt = 5,5, a1 = 0,5, a2 = -0,5, yh = 20, yl = -20);

Переходные характеристики получают при том же возмущающем воздействии.

Анализ проводят по каждому варианту.

В виде дополнительных вариантов задания может быть предложен анализ при других вариантах возмущения с изменением базового варианта (рис. 21).

3. Провести анализ изменения показателей качества работы САР контура регулирования температуры воздуха в помещении при изменении диапазона варьирования возмущающего воздействия. Анализируются переходные характеристики при работе ПИД-регулятора (см. рис. 21).

Базовый вариант – возмущение в пределах, указанных в разделе «параметры начального состояния» расчетной программы «regxol VBEx».

При определении переходной характеристики анализируемого варианта возмущающее воздействие увеличивают / уменьшают на 25÷30 %.

В виде вариантов задания могут быть предложены различные каналы возмущения (см. рис. 11 и 12). В этом случае базовый вариант (рис. 21) изменяется.

4. Провести анализ изменения показателей качества САР контура регулирования температуры воздуха в помещении при изменении уровня стабилизации температуры (уставки регулятора, *zp*).

Базовый вариант переходной характеристики – на рис. 21 (работа ПИД-регулятора).

При определении переходных характеристик анализируемых вариантов в разделе «настройка параметров функционального регулятора» устанавливают численное значение «zp=...». Например, zp = 3 °C и zp = 7 °C (возмущение при запуске программы не подавать). График перехода на новый уровень стабилизации анализируется как переходной процесс.

На уровнях zp = 3 °C и zp = 7 °C определяют и анализируют также переходные характеристики, полученные при отклонении от номинала возмущающих воздействий, например,

1. dmp = 400 и dmp = -400,

2. dpe = 3 и dpe = -3.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Благовещенская М.М. Злобин Л.А. Информационные технологии систем управления технологическими процессами PDF. ... 1991. – 352 с. (Учебники и учеб. пособия для студентов высших учебных заведений.

2. Автоматизированные системы управления технологическими процессами мясной молочной промышленности / В.А. Граф, Н.А. Рогов, Ю.Г. Стегаличев, А.Д. Фрезоргер. – М.: Агропромиздат, 1985. – 280 с.

3. Холодильные склады и холодильные камеры. Системы контроля, мониторинга, управления ООО «Эйркул». http://www.coldstore.ru/sistemi\_kontrolya,\_monitoringa,\_upravleniya.

4. Стегаличев Ю.Г., Балюбаш В.А., Замарашкина В.Н. Технологические процессы пищевых производств. Структурнопараметрический анализ объектов управления: Учеб. пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 254 с.

5. Мазуров В.М. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Ч. 1. Промышленные объекты. Компоненты и технологии. 2003. http://www.kit-e.ru/articles/elcomp/ 2003\_04\_154.php.

6. Теория автоматического управления / Под ред. В.Б. Яковлева. – М.: Высш. шк., 2005. – 567 с.

7. Моделирование производственных процессов мясной и молочной промышленности / Под ред. Ю.А. Ивашкина. – М.: Агропромиздат, 1987. – 232 с.

8. Автоматизация технологических процессов пищевых производств / Под ред. Е.Б. Карпина. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 536 с.

9. Автоматика и автоматизация производственных процессов в мясной и молочной промышленности / В.В. Митин [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1987. – 240 с.

10. Дульнев Г.Н. Теория тепло- и массообмена: Учеб. пособие. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 195 с.

11. Мазуров В.М. Автоматические регуляторы в системах управления и их настройка. Ч. 2. Автоматические регуляторы и их настройка. Общие сведения о промышленных системах регулирова-

ния / Компоненты и технологии. 2003. http://www.kit-e.ru/articles/ elcomp/2003\_05\_114.php.

12. Зельднер Г. Программируем на языке QUICK BASIC 4.5.: Учеб. пособие / Г. Зельднер. – ABF, 1996. – 432 с.

13. Компилятор Qbasic1/4/7.1 http://koding.ucoz.net/publ/skachat \_ kompilatori/kompiljator\_dlja\_basic/2-1-0-1.

14. Компилятор Visual Basic 6 (VB6) – Скачать компиляторы... koding.ucoz.net>...kompiljator\_dlja\_visual\_basic6/2...

15. Использование Visual Basic для автоматизации Microsoft Excel support.microsoft.com>KB/219151.

16. Балюбаш В.А., Алёшичев С.Е. Формирование многоканальной системы стабилизации влажности сливочного масла // Сыроделие и маслоделие. 2007. № 2. С. 45–46.

17. Брусиловский Л.П., Вайнберг А.Я. Автоматизация технологических процессов в молочной промышленности. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Пищ. пром-сть, 1978. – 343 с.

18. **Брусиловский Л.П., Вайнберг А.Я.** АСУТП цельномолочных и молочно-консервных производств. – М.: Колос, 1993. – 363 с.

19. **Ивашкин Ю.А. и др.** Моделирование производственных процессов мясной и молочной промышленности / под ред. Ю.А. Ивашкина. – М.: Агропромиздат, 1987. – 232 с.

20. **Карпин Е.Б. и др.** Автоматизация технологических процессов пищевых производств / под ред. Е.Б. Карпина. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Агропромиздат, 1985. – 536 с.

21. Митин В.В. и др. Автоматика и автоматизация производственных процессов в мясной и молочной промышленности. – М.: Агропромиздат, 1987. – 240 с.

22. Процессы и аппараты пищевых производств.: Учеб. для вузов / под ред. А. Н. Острикова. – СПб.: ГИОРД, 2012. – 616 с.

23. Стегаличев Ю.Г., Балюбаш В.А., Замарашкина В.Н. Технологические процессы пищевых производств. Структурнопараметрический анализ объектов управления: Учеб. пособие для ВУЗов. ГРИФ УМО. – Ростов н/Д – СПб.: Феникс, 2006. – 254 с.

24. Технологические процессы и производства / М.Б. Абугов, С.Е. Алёшичев, В.А. Балюбаш, Ю.Г. Стегаличев. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2013. – 93 с.

25. Стегаличев Ю.Г. и др. Расчет технологических режимов производства вареных колбас// Пищ. пром-сть. 1988. №4. С. 23–27.

26. ГОСТ Р 50779.41-96 (ИСО 7873-93). Статистические методы. Контрольные карты для арифметического среднего с предупреждающими границами. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 16 с.

27. Контроль и автоматизированное управление качеством продукции / С.Е. Алёшичев, М.Б. Абугов, В.А. Балюбаш, Ю.Г. Стегаличев. – СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2014. – 51 с.

### СОДЕРЖАНИЕ

СПИ	СОК ПРИНЯТЫХ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ	3
1 OE	ЧЕНИЕ	5
1. UD	ΟЩΗΕ ΠΟΠΟΜΕΠΗΛ Όνιστυρμο παραμέτριμε αναμά αμα πμό	0
2. CI	PYKIYPHO-HAPAMEIPHYECKHHAHAJHS	12
	Овекта управления (10)	15
2.1.	составление и оформление технологической схемы	12
<u> </u>	Вороботка и оформирание отружтирие	15
Δ.Δ.	Разработка и оформление структурно-	
	Параметрической схемы объекта.	17
$\gamma \gamma$	А налиа произволотронных антуаний на общество	1/
2.3.	Анализ производственных ситуации на объекте.	
	Оформление результатов анализа в таолицах	24
2 140		24
5. FIC	ΟΠΕΔΟΒΑΠΗΕ ΧΑΡΑΚΤΕΡΗΟΤΗΚ ΠΟΓΟ2ΦΕΙΙΠΟΓΟ ΟΓΊ ΕΚΤΑ ΥΠΡΑΡΠΕΙΙΗ ΤΙΑ	
		22
		33
5.1.	Разработка и оформление расчетного модуля для	
	исследования статических и динамических	24
27		54 42
3.2.	Алгоритм расоты с расчетным модулем <i>морто</i>	43
5.5.	Определение статических характеристик объекта	16
2 4	с использованием расчетного модуля <i>морто</i>	40
5.4.	Определение динамических характеристик объекта	51
25		34
3.5.	программы и модуль для исследования динамических	
	и статических характеристик, реализованные	
	в «visual Basic». Стенд для проведения лаоораторных	57
20	занятии по теме	57
3.6.	Анализ результатов исследования статических	(2)
27	и динамических характеристик 10	63
3.7.	Задания для практических и лабораторных работ	
	по теме: «Анализ изменений статических	
	и динамических характеристик объекта управления	
	(проточного теплообменника) при изменении	
	конструктивных характеристик и производственных	
	ситуаций»	66

3.8. Задания для курсовых и самостоятельных работ по	
теме: «Параметрический анализ и анализ	
производственных ситуаций при разработке системы	
автоматического управления (САУ)	69
4. СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ	
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО	
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ	
КОМПЛЕКСОВ	73
4.1. Структурно-параметрический анализ контура САР	73
4.2. Исследование переходных характеристик	
качественных параметров автоматизированного	
комплекса при изменении возмущений	
и производственных ситуаций	86
4.3. Анализ результатов исследования качественных	
характеристик САР температуры в производственном	
помешении	88
4.4. Лабораторная работа	
Сравнительный анализ качества работы САР при	
различных настройках контура регулирования	
температуры возлуха в произволственном помещении	98
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	102
	• • <b>-</b>

## Алёшичев Сергей Евгеньевич Балюбаш Виктор Александрович Стегаличев Юрий Георгиевич

## ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПИЩЕВЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Учебное пособие

Ответственный редактор Т.Г. Смирнова

Компьютерная верстка С.Е. Алёшичев

> Дизайн обложки Н.А. Потехина

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 29.12.2016. Формат 60×84 1/16 Усл. печ. л. 6,28. Печ. л. 6,75. Уч.-изд. л. 6,5 Тираж 100 экз. Заказ № С 69

Университет ИТМО. 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49 ИИК ИХиБТ. 191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9