

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Омский государственный технический университет»

Л. А. Денисова

**РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
В СРЕДЕ MATLAB**

Учебное пособие

Омск
Издательство ОмГТУ
2023

УДК 681.5:004.94(075)
ББК 32.965+32.973я73
Д33

Рецензенты:

B. A. Филимонов, д-р техн. наук, проф., ст. науч. сотрудник Омского филиала Института математики им. С. Л. Соболева СО РАН;

A. Г. Малютин, канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Автоматика и системы управления» Омского государственного университета путей сообщения

Денисова, Л. А.

Д33 Разработка, исследование и оптимизация автоматизированных систем управления в среде MATLAB : учеб. пособие / Л. А. Денисова ; Минобрнауки России, Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2023. – 120 с. : ил.

ISBN 978-5-8149-3631-8

Рассмотрены вопросы проектирования автоматизированных систем управления на основе математического моделирования и многокритериальной оптимизации с использованием генетических алгоритмов. Приведены задания для самостоятельного выполнения с применением программ, реализованных в среде MATLAB.

Издание предназначено для студентов, обучающихся по специальности 09.05.01 «Применение и эксплуатация автоматизированных систем специального назначения» и направлению 05.04.04 «Автоматизация технологических процессов и производств», а также аспирантов, обучающихся по научной специальности 2.3.1 «Системный анализ, управление и обработка информации, статистика». Может быть полезно специалистам в области проектирования программно-технических комплексов автоматизированных систем управления технологическими процессами.

УДК 681.5:004.94(075)
ББК 32.965+32.973я73

*Печатается по решению редакционно-издательского совета
Омского государственного технического университета*

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ	6
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ	9
1.1. Характеристика объекта и назначение системы управления.....	9
1.2. Задачи автоматизированного проектирования программно-алгоритмического обеспечения контроллеров	10
2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯТОРОВ УРОВНЯ	14
2.1. Подготовка исходных данных для моделирования	14
2.2. Математическая модель системы регулирования уровня	16
2.3. Оптимизация параметров регуляторов уровня.....	20
2.4. Лабораторная работа № 1.....	27
2.5. Анализ устойчивости регуляторов уровня.....	36
2.6. Лабораторная работа № 2.....	41
3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ	48
3.1. Подготовка исходных данных для моделирования	48
3.2. Математическая модель системы регулирования давления	50
3.3. Оптимизация параметров регуляторов давления	52
3.4. Лабораторная работа № 3.....	58
3.5. Анализ устойчивости регуляторов давления	66
3.6. Лабораторная работа № 4.....	71
4. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ПЕЧИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ.....	81
4.1. Краткое описание оборудования и технологического процесса	81
4.2. Принципы построения многосвязной системы управления	82

4.3. Требования к системе управления и постановка задачи проектирования МСР.....	85
4.4. Математическая модель объекта регулирования – технологического процесса многопоточной печи.....	89
4.5. Математическая модель многосвязной системы регулирования	94
4.6. Лабораторная работа № 5	99
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	109
 БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	111
 ПРИЛОЖЕНИЕ. Некоторые функции MATLAB	115

ПЕРЕЧЕНЬ ОСНОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АСУ ТП – автоматизированная система управления технологическим процессом;

АЭС – атомная электрическая станция;

АФХ – амплитудно-фазовая характеристика;

АЧХ – амплитудно-частотная характеристика;

БРУ-СН – быстродействующая редукционная установка собственных нужд;

ВВЭР – водо-водянй энергетический реактор;

ГА – генетический алгоритм;

ИМ – исполнительный механизм;

МСР – многосвязная система регулирования;

П – пропорциональный;

ПВД – подогреватель высокого давления;

ПД – пропорционально-дифференциальный;

ПИ – пропорционально-интегральный;

ПИД – пропорционально-интегрально-дифференциальный;

ПНД – подогреватель низкого давления;

ПТК – программно-технический комплекс;

РК – регулирующий клапан;

САР – система автоматического регулирования;

САР МЗ – система автоматического регулирования машинного зала;

САУ – система автоматического управления;

ТА – турбоагрегат;

ТП – технологический процесс;

УП – указатель положения;

ФЧХ – фазочастотная характеристика;

ЦВД – цилиндр высокого давления;

ЦНД – цилиндр низкого давления.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время в нашей стране развитие топливно-энергетического комплекса является одной из приоритетных задач. В связи с тем что автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) объектов энергетики разрабатываются на основе цифровых программно-технических комплексов нового поколения, к средствам их проектирования предъявляются новые, более высокие требования [1–3]. Поэтому возникает необходимость в подготовке специалистов, владеющих современными инструментами проектирования математического и программного обеспечения АСУ ТП, методами и средствами моделирования и оптимизации [3–10].

В научно-технической и учебной литературе по автоматизированным системам применяется следующий стандартизованный термин: АСУ ТП – это человеко-машина система, реализующая автоматизированный процесс сбора и переработки информации, необходимой для принятия решений по управлению технологическим объектом [3–12]. Обычно информация о выходных параметрах (состоянии) объекта управления собирается и обрабатывается в автоматическом режиме. На основании этой информации человек-оператор принимает решение по выработке управляющего воздействия или изменению цели управления (в некоторых случаях используя автоматически сформированную системой поддержки принятия решений «советующую» информацию). Оператор действует на основании имеющихся у него опыта, знаний и технологического регламента, стремясь обеспечить требуемые показатели качества работы системы. Затем принятое решение доводится до объекта управления с помощью технических средств (т. е. автоматически) [12–17].

Цель настоящего пособия – помочь студентам овладеть навыками создания математических моделей автоматизированных систем и их компонентов, а также научить их применять математический аппарат теории ав-

томатического управления при выполнении расчетов на ЭВМ [12–18]. Использование приведенных в пособии моделей и программ позволит будущему специалисту решать задачи проектирования и оптимизации автоматизированных систем, возникающие на практике [1–7, 9–12, 19].

В пособии рассмотрены вопросы проектирования АСУ ТП (включая анализ и синтез подсистем регулирования) на примере разработки программно-технического комплекса систем автоматического регулирования машинного зала (ПТК САР МЗ) энергоблоков 1 и 2 Кольской АЭС с энергетическим реактором ВВЭР-440 [20]. Представлена технология многокритериальной оптимизации работы регуляторов уровня и давления по принятым критериям качества [1, 8, 20–22].

Предлагаются к рассмотрению результаты исследования системы управления технологическим объектом нефтеперерабатывающего завода с помощью многосвязной системы автоматического регулирования (МСР) на примере многопоточной печи [23].

Для самостоятельного выполнения студентам предлагаются задания по созданию математических моделей контуров регулирования и их многокритериальной оптимизации на базе генетических алгоритмов (ГА). Для этого используются программы, реализованные в среде MATLAB. Также приводятся задания по проведению анализа устойчивости контуров автоматического регулирования.

В основу пособия положены результаты разработки и исследования математического и программного обеспечения ПТК САР МЗ, выполненных автором настоящего пособия, который на протяжении многих лет является сотрудником ООО «Автоматика-Э». Созданный на предприятии программно-технический комплекс САР МЗ введен в промышленную эксплуатацию на энергоблоках 1 и 2 Кольской АЭС в 2015 году.

Кроме того, в пособии использованы результаты выполненного автором проектирования супервизорной системы регулирования для многопоточной печи установки нефтеперерабатывающего производства.

В связи с общностью принципов построения автоматизированных систем, встречающихся в инженерной практике, целесообразно использование предлагаемой методологии для разработки систем управления различными технологическими процессами.

Изложенный материал рекомендуется аспирантам соответствующих научных специальностей для самостоятельного изучения современных методов анализа и проектирования автоматизированных систем, а также математического моделирования систем управления в рамках выполнения научно-исследовательских работ.

1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ И ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА И НАЗНАЧЕНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Вопросы проектирования автоматизированной системы управления рассмотрим, используя результаты создания ПТК САР МЗ, предназначенного для автоматического регулирования технологического оборудования турбинного отделения энергоблоков 1, 2 Кольской АЭС.

Приведем краткое описание оборудования технологического объекта управления [19]. Энергоблок мощностью 440 МВт состоит из реакторной установки В-440, содержащей водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР), шесть циркуляционных петель первого контура и шесть горизонтальных парогенераторов, и двух турбоустановок. Турбоустановка К-220-44 представляет собой одновальный агрегат с одним цилиндром высокого давления (ЦВД) и двумя двухпоточными цилиндрами низкого давления (ЦНД). Каждая турбоустановка содержит: конденсатный тракт с конденсатором, тремя конденсатными электронасосами, пятью поверхностными подогревателями низкого давления (ПНД); питательный тракт с тремя подогревателями высокого давления (ПВД) и двумя ступенями парового промежуточного перегрева пара в пароперегревателях ПП-1 и ПП-2, снабженных конденсатосборниками.

Деаэрационно-питательная установка состоит из двух деаэраторов производительностью по 1600 т/ч питательной воды при постоянном давлении 7 кгс/см² в баках и пяти питательных электронасосов, один из которых является резервным. Автоматическое поддержание давления в деаэраторе осуществляется изменением расхода пара через регулирующий клапан (РК) при подаче пара на деаэратор от отборов турбины.

На каждом блоке установлено по две быстродействующие редукционные установки собственных нужд (БРУ-СН), предназначенные для редуцирования острого пара, подачи его в коллектор 7 ата и автоматического поддержания номинального давления в коллекторе 7 ата при работе блока на

пониженных нагрузках. Включение БРУ-СН в работу происходит автоматически при снижении давления в коллекторе 7 ата до $5,7 \text{ кгс}/\text{см}^2$.

Паровые лабиринтовые уплотнения вала турбины предназначены для предупреждения протекания пара из ЦВД в машинный зал и присосов воздуха в конденсаторы через ЦНД. Уплотнения штоков стопорных и регулирующих клапанов предназначены для предотвращения протечек пара по штокам клапанов в машинный зал. Подача пара к уплотнениям вала турбины осуществляется от пароуравнительной линии деаэраторов блока или от парового коллектора 7 ата. Пар к клапанам подается из магистрали 7ата или от пароуравнительной линии деаэраторов.

Блоки автоматического регулирования в составе ПТК САР МЗ обеспечивают выполнение алгоритмов работы САР для поддержания на заданном уровне или изменение по заданному закону таких технологических параметров, как уровень жидкости в резервуаре и давление. При этом должны быть реализованы:

- регуляторы уровня двухимпульсные с жёсткой обратной связью по положению регулирующего клапана;
- регуляторы давления одноимпульсные (с контролем положения регулирующего клапана).

Регуляторы ПТК САР МЗ распределены по шкафам управления в соответствии с регулируемым оборудованием турбоагрегатов (ТА).

Для анализа устойчивости контуров регулирования и расчета параметров настроек регуляторов были приняты характеристики оборудования в соответствии с данными Кольской АЭС.

1.2. ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНО-АЛГОРИТМИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОНТРОЛЛЕРОВ

Для разработки программно-алгоритмического обеспечения контроллеров необходимо решить следующие задачи: выполнить моделирование и оптимизацию САУ, расчет устойчивости контуров регулирования, а также

осуществить визуализацию полученных при проектировании результатов. Рассмотрим подробнее решаемые задачи автоматизированного проектирования [20].

1. Моделирование САУ. Моделирование процессов в системах управления является одной из основных задач, решаемых на начальном этапе проектирования системы. При создании моделей технологических процессов (ТП) проводятся два этапа исследований: параметризация моделей и определение параметров моделей по экспериментальным данным. На этапе параметризации на основе априорных данных о технологическом процессе разрабатывалась его модель с точностью до параметров. Принималось во внимание, что динамические модели технологических процессов (например, каналы регулирования давления, уровня жидкости в резервуарах и т. д.) приближенно представляются полиномами первой или второй степени, что дает удовлетворительный для практики результат [12–17, 24–26].

На этапе определения параметров моделей обрабатываются данные о динамических характеристиках систем, предоставленные Кольской АЭС. Кроме того, с целью оценки неизвестных параметров модели осуществляется статистическая обработка экспериментальных данных, полученных на других энергоблоках.

Так как информация о протекании технологических процессов в действующих САУ регистрируется и архивируется имеющейся информационно-вычислительной системой, она была использована в качестве исходных данных для разработки математической модели объекта управления. На основе архивной информации получены данные о динамических характеристиках систем и о статистических характеристиках возмущающих воздействий, используемые для построения моделей случайных возмущений. Кроме того, при создании математических моделей объектов управления приняты во внимание свойственные им нелинейности.

2. Оптимизация САУ. В процессе разработки и оптимизации систем автоматического управления и регулирования необходимо учитывать разнообразный комплекс требований, связанных с различными их характери-

стиками [1, 2, 8, 20–23]. К основным, как правило, относят требования, касающиеся статических и динамических свойств систем управления. Среди них важное место занимают точностные характеристики, определяющие ошибки, возникающие в различных режимах работы системы.

Кроме того, к САУ применяются критерии качества, построенные на основе минимизации времени переходного процесса, минимизации потребления энергии и т. д. Важными требованиями к САУ, которые также необходимо учитывать при синтезе, являются требования, связанные с ее устойчивостью к влиянию внешних воздействий.

Следует отметить, что предъявляемые к САУ требования являются противоречивыми, и возникает необходимость в использовании нескольких показателей качества функционирования систем. Поэтому для создания системы, удовлетворяющей предъявляемым требованиям, должна ставиться задача ее многокритериальной оптимизации.

Задачи наилучшего выбора при наличии многих критериев являются предметом теории принятия решений [27]. Выбор решения состоит в указании среди допустимых решений некоторого решения, которое объявляется наилучшим. Одним из основных фундаментальных понятий теории принятия решений является понятие оптимального по Парето (эффективного) решения [27]. Оно представляет собой обобщение понятия точки экстремума числовой функции на случай нескольких функций. При этом решение Парето-оптимально, если значение любого из критериев можно улучшить лишь за счет ухудшения значений остальных критериев.

На основе положений теории принятия решений осуществляется обоснованный выбор. Согласно принципу Эджвортта – Парето [27], наилучшие решения следует выбирать среди Парето-оптимальных решений. При многокритериальной оптимизации САУ необходимо выполнить построение множества Парето-оптимальных решений, не улучшаемых одновременно по всем рассматриваемым критериям.

Для решения задач многокритериальной оптимизации, требующих многократного моделирования исследуемой системы управления при раз-

личных значениях варьируемых параметров, используются методы Парето-аппроксимации на основе генетических алгоритмов [1, 8, 20–22, 28–32].

3. Анализ устойчивости САУ. Анализ устойчивости контуров регулирования выполняется на основе разработанных математических моделей с использованием результатов оптимизации САУ. Для применения аналитических методов анализа устойчивости [12–15, 24–26] производится аппроксимация релейно-импульсных регуляторов линейными регуляторами. Выполняется преобразование структурных схем системы для представления моделей в виде передаточных функций с целью вычисления полюсов и построения частотных характеристик, позволяющих оценить запасы устойчивости САУ.

4. Визуализация результатов проектирования САУ. С целью контроля всего процесса проектирования и оптимизации регуляторов созданы программные модули построения графиков переходных процессов САУ. Для контроля выполнения оптимизации САУ реализована возможность построения аппроксимации множества Парето-оптимальных решений.

Для наглядного представления полученных результатов и контроля расчета параметров настроек регуляторов, оптимизации и анализа устойчивости контуров регулирования осуществляется построение изображений областей допустимых настроек на графиках обобщенных критериев качества САУ [20].

Таким образом, выполняются анализ, синтез и оптимизация программино-алгоритмического обеспечения микропроцессорных контроллеров, предназначенных для автоматического регулирования технологического оборудования турбинного отделения энергоблоков 1 и 2 Кольской АЭС.

2. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯТОРОВ УРОВНЯ

2.1. ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Перечень регуляторов и характеристики контуров регулирования уровня для ТА-1 приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1
Перечень регуляторов уровня ТА-1

№ п/п	Наименование регулятора	Диапазон датчика, кгс/м ²	Наименование технологическое	Наименование регулирующего клапана	Заданное значение и точность поддержания, мм
1	Регулятор уровня в конденсаторе ТА-1	0–2500	1РУ-1	Клапан регулятора уровня в конденсаторе ТА-1	750 ± 50
2	Регулятор уровня в ПНД-2 (3–5) ТА-1	0–1600	1РУ-2 (3–5)	Клапан регулятора уровня на напоре сливного насоса ПНД-2 (3–5) ТА-1	900 ± 50
3	Регулятор уровня в ПВД-6 ТА-1	0–1000	1РУ-6	Клапан регулятора уровня ПВД-6 ТА-1	400 ± 50
4	Регулятор уровня в ПВД-7 (8) ТА-1	0–1000	1РУ-7 (8)	Клапан регулятора уровня ПВД-7(8) ТА-1	350 ± 50
5	Регулятор уровня в СС СПП ТА-1	0–630	1РУ-9	Клапан регулятора уровня в сепаратор-сборнике СПП ТА-1	200 ± 50
6	Регулятор уровня в конденсато-сборнике 1-й (2-й) ступени СПП ТА-1	0–630	1РУ-10 (11)	Клапан регулятора уровня на линии слива конденсата из пароперегревателя 1-й (2-й) ступени СПП ТА-1	300 ± 50

№ п/п	Наименование регулятора	Диапазон датчика, кгс/м ²	Наименование технологическое	Наименование регулирующего клапана	Заданное значение и точность поддержания, мм
7	Регулятор уровня в деаэраторе 1Д-6	0–0,4	РУ-1Д	Клапан регулятора уровня на линии подачи хим. обессоленной воды в конденсатор турбины № 1	2500 ± 100
8	Регулятор уровня в баке № 1 с технической водой	0–2500	РУ-13	Клапан регулятора уровня на подводе к баку запаса технической воды № 1	1600 ± 100

В табл. 2.2 приведены параметры объекта управления, используемые при расчетах параметров контура регулирования уровня. Величина заданного значения уровня для всех регуляторов задавалась в процентах от максимального значения изменения регулируемого параметра (H_{\max}).

Таблица 2.2

Параметры объекта управления

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение и размерность	Значение (диапазон)
1	Заданное значение уровня	$H_{\text{зад}}$, % H_{\max}	30–50
2	Время открытия клапана регулирующего	$T_{\text{им}}$, с	25
3	Коэффициент передачи объекта	K_o , % /%откр	0,01*
4	Постоянная времени объекта	T_o , с	От 30 до 40*
* Вследствие отсутствия данных приняты предположительные значения			

Регуляторы уровня, входящие в состав ПТК САР МЗ, формируют управляющие воздействия на электроприводы регулирующих клапанов.

При этом реализуется:

- поддержание заданного уровня воды с требуемой точностью (см. табл. 2.1);
- импульсное регулирование по пропорциональному (Π) закону регулирования совместно с исполнительным механизмом и датчиком положения исполнительного механизма (с жесткой обратной связью по положению РК).

2.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ УРОВНЯ

Регулятор уровня реализует одноимпульсную систему регулирования: на вход регулятора подаются сигналы измеренного уровня воды (импульс по уровню), а также сигнал от указателя положения (УП) регулирующего клапана для реализации местной обратной связи.

В интерактивной среде для выполнения научных и инженерных расчетов MATLAB с расширением Simulink [33–36] разработана математическая модель САР уровня (рис. 2.1), которая в свою очередь содержит модели: регулятора уровня (controller), исполнительного механизма (ИМ) с регулирующим питательным клапаном (regulating door) и технологического объекта управления (control object).

В регуляторе уровня используется традиционный способ регулирования, применяемый в системах регулирования параметров теплоэнергетических процессов с исполнительными механизмами постоянной скорости, который реализуется в контроллере.

Сигнал рассогласования на входе в регулятор уровня формируется взвешенным суммированием сигналов заданного, текущего значения уровня, а также сигнала обратной связи по положению регулирующего клапана.

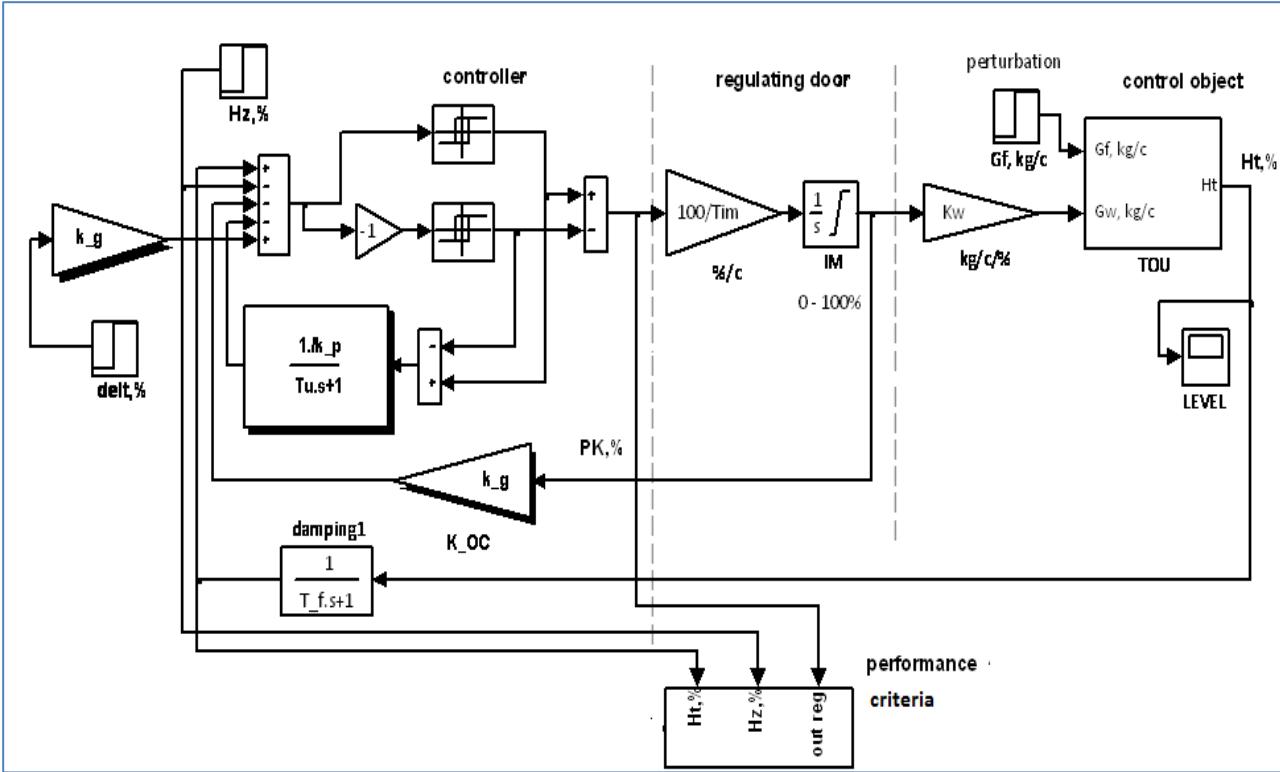


Рис. 2.1. Схема модели системы автоматического регулирования уровня

Кроме того, в связи с тем, что регулятор с местной обратной связью по положению РК имеет статическую ошибку, на вход регулятора вводится сигнал, корректирующий задание для ее устранения. Выходными сигналами являются импульсы, формируемые в контроллере и поступающие на исполнительный механизм для открытия / закрытия регулирующего клапана, причем скважность выходных импульсов связана пропорционально-дифференциальной (ПД) зависимостью с изменением сигнала рас согласования.

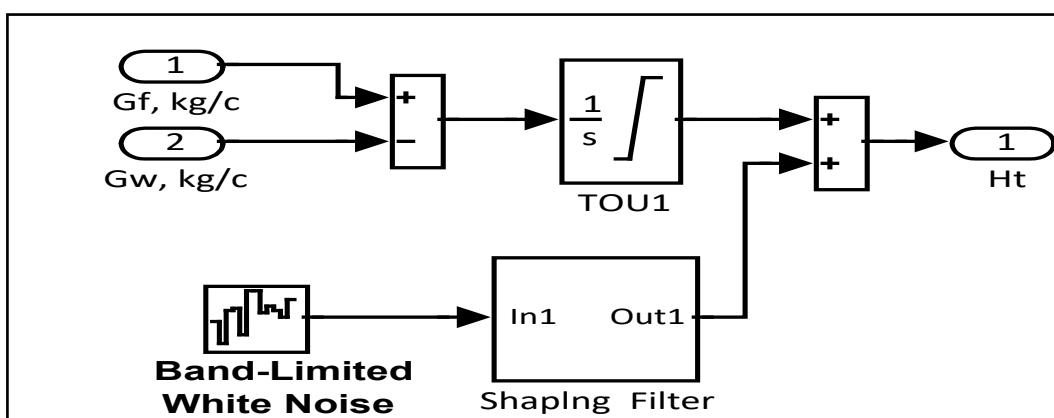
Описанный релейно-импульсный регулятор совместно с ИМ постоянной скорости и сигналом по положению РК приближенно реализует П-закон регулирования в основном, скользящем режиме работы. Кроме того, в модели присутствуют инерционные звенья для демпфирования входного сигнала измеренного уровня (damping).

Формируемая регулятором выходная последовательность импульсов поступает на исполнительный механизм РК, который представлен усилильным и интегрирующим звенями (regulating door). С выхода усили-

тельного звена, коэффициент передачи которого учитывает время открытия клапана $T_{им} = 25$ с, сигнал скорости перемещения РК поступает на интегратор с ограничениями (от 0 до 100 % по УП). Сигнал положения РК поступает на объект управления, где формируется сигнал расхода воды умножением сигнала положения РК на коэффициент передачи $k_w = 0,89$ кг/с/% (принято предположительное значение, обеспечивающее материальный баланс расходов воды и перемещение РК в рабочем диапазоне от 20 до 60 % УП).

Подсистема control object предназначена для моделирования канала регулирования «расход воды от РК – изменение уровня воды» (рис. 2.2). Подсистема control object имеет два входа: расход воды от регулирующего клапана и параметр perturbation для формирования возмущений (расход воды на притоке или стоке, в зависимости от типа регулятора). Выходной переменной является уровень воды, который является интегралом от материального баланса расходов воды на притоке и стоке из рассматриваемой емкости.

Кроме того, в модели учтены флюктуации случайных возмущений (пульсаций) уровня, реализуемые формирующим фильтром Shaping Filter, выход которого далее суммируется с выходом интегратора. При этом генерация входного нормально распределенного белого шума производится с помощью блока Band-Limited White Noise.



*Rис. 2.2. Схема модели канала регулирования
«расход воды от РК – изменение уровня»*

Параметрами настройки регулятора являются коэффициент передачи k_p , постоянная времени интегрирования T_i , а также коэффициент обратной связи k_g (основной параметр настройки). Звенья, содержащие указанные параметры, на рис. 2.1 выделены тенью. Выбор указанных параметров осуществлялся при оптимизации.

Также в модели выполняется расчет интегральных показателей качества регулирования (performance criterion). За период времени T (принимается не менее длительности переходного процесса) вычисляются квадратичные интегральные критерии:

$$\bar{F}_1(X) = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt, \quad (2.1)$$

характеризующий величину и длительность существования ошибки регулирования $\varepsilon(t)$ (отклонения регулируемого параметра от заданного значения), и

$$\bar{F}_2(X) = \int_0^T u^2(t) dt, \quad (2.2)$$

учитывающий затраты на управление (u – выходной сигнал регулятора).

Также за указанный временной интервал считается количество импульсов n , формируемых регулятором (срабатываний ИМ РК):

$$\bar{F}_3(X) = n. \quad (2.3)$$

Так как критерии $\bar{F}_i(X)$, $i = \overline{1,3}$, имеют разные диапазоны изменения, то для приведения к диапазону от 0 до 1 они нормализованы по формуле

$$F_i(X) = \frac{\bar{F}_i(X) - \bar{F}_i^{\min}}{\bar{F}_i^{\max} - \bar{F}_i^{\min}}, \quad i = \overline{1,3},$$

где $\bar{F}_i^{\min} = \min \bar{F}_i(X)$; $\bar{F}_i^{\max} = \max \bar{F}_i(X)$.

Необходимо выполнить оптимизацию САР уровня, то есть найти такие значения параметров k_p , T_i , k_g , которые минимизируют принятые показатели $\bar{F}_i(X)$, $i = \overline{1,3}$ для обеспечения быстродействия, отсутствия перегулирования и уменьшения числа срабатываний ИМ.

2.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ УРОВНЯ

Как показали предварительные исследования и предшествующий опыт проектирования САР [1, 8, 20–22], минимальные значения частных критериев качества $F_i(X)$, $i = \overline{1,3}$, достигаются при различных параметрах настройки САР, что говорит о необходимости достижения компромисса между ними при оптимизации.

Совокупность $m = 3$ частных критериев $F_i(X)$, $i = \overline{1,3}$, образует векторный критерий оптимальности (векторную целевую функцию) $F(X) \in \{F\}$, где $X \in \{X\}$ – вектор варьируемых параметров; $\{X\}$, $\{F\}$ – пространства параметров и векторных критериев соответственно.

Минимизация каждого из частных критериев выполняется в одной и той же области допустимых значений параметров, которую обозначим D_X . Тогда во введенных обозначениях задачу многокритериальной оптимизации можно записать в виде $\min_{X \in D_X} F(X) = F(X^o) = F^o$, где X^o , F^o – решения задачи.

Одновременная минимизация критериев $F_i(X)$, $i = \overline{1,m}$, соответствует построению множества Парето-оптимальных решений $P_F(X)$, то есть таких допустимых решений, которые не могут быть улучшены (уменьшены) ни по одному из имеющихся критериев без ухудшения (увеличения) по какому-то хотя бы одному другому критерию.

Для решения задачи многокритериальной оптимизации САР уровня использован подход, предложенный и опробованный для оптимизации традиционных релейно-импульсных САР [20–22], включающий в себя следующие три этапа.

На *первом этапе* из принятых показателей качества $F_i(X)$, $i = \overline{1, 3}$ выбираются основные частные критерии $F_1(X)$ и $F_2(X)$, характеризующие точность регулирования и затраты на управление.

Далее задача оптимизации рассматривается как двухкритериальная. Принимается во внимание, что, согласно принципу Эджворт – Парето [27], наилучшие решения многокритериальной задачи всегда следует выбирать в пределах множества Парето-решений $P_F(X)$, определяемого соотношением $P_F(X) = \{X^o \in \{X\} \mid \text{не существует } X \in \{X\} \text{ такого, что } F_i(X) \leq F_i(X^o), i = \overline{1, m}, F_i(X) \neq F_i(X^o)\}$.

На *втором этапе* для основных критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$ находится множество Парето-оптимальных решений $P_F(X)$ – таких допустимых решений, которые не могут быть улучшены (уменьшены) по одному из имеющихся критериев без ухудшения (увеличения) по другому критерию.

Так как множество Парето-оптимальных решений еще не является окончательным решением при выборе варианта параметров САР (необходимо получить не несколько, а одно предпочтительное решение), то после получения множества $P_F(X)$ для его сужения используется т. н. лексикографический подход [22, 27], сущность которого заключается в следующем. Частные критерии упорядочиваются по важности и привлекаются поочередно для выбора параметров в качестве дополнительной информации, пока не будет получено единственное решение.

На *третьем, заключительном, этапе* для окончательного выбора варианта параметров САР в качестве дополнительного вводился критерий $F_3(X)$, минимальное значение которого отыскивалось среди множества Парето-решений, полученных по критериям $F_1(X)$ и $F_2(X)$.

Для реализации описанного подхода и построения множества Парето-оптимальных решений использован метод Парето-аппроксимации на основе генетических алгоритмов (ГА) [30]. Генетический алгоритм представляет собой метод поиска оптимальных решений, основанный на копировании механизмов биологического естественного отбора и генетического наследования [28, 30].

Преимуществом ГА по сравнению с традиционными методами оптимизации является то, что поиск решения выполняется исходя из множества (популяции) точек.

Основными операциями генетических алгоритмов при приближенном построении множества Парето являются операция скрещивания (*crossover*) наиболее приспособленных особей и операция случайных мутаций (*mutation*), позволяющих получать индивидуумы с новыми свойствами. Кроме того, специфическими для задачи построения множества Парето являются операции вычисления пригодности индивидуума и отбора (селекции) для сходимости к фронту Парето.

Для построения множества Парето-решений и моделирования исследуемой САР использовались специально созданные m-файлы – сценарии системы MATLAB, выполняющие многократные вызовы Simulink-модели САР (см. рис. 2.1), установку необходимых опций многоцелевого ГА и контроль выполнения оптимизации. Поиск множества Парето-решений проводился процедурой *gamultiobj* многоцелевого генетического алгоритма, реализованного на основе известного генетического алгоритма Парето-аппроксимации *NSGA-II* (*Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*) [30, 37].

Алгоритм Парето-аппроксимации *NSGA-II*, являясь элитарным ГА, имеет механизм включения лучших (*elite*) особей данной популяции (с высокими значениями функции пригодности для перемещения в направлении множества Парето) без изменения в следующую популяцию. Кроме того, алгоритм поддерживает разнообразие популяций, рассматривая особей с более низкими значениями функции пригодности для сходимости к фронту Парето.

Для получения результатов требовалось от 5 до 20 поколений ГА. В связи с тем, что при оптимизации САР осуществлялся поиск параметров k_p , T_i , k_g , доставляющих минимум векторному критерию оптимальности $F(X) = F(k_p, T_i, k_g)$, то для использования генетического алгоритма в качестве «особи» принят вектор параметров $X = (k_p, T_i, k_g)$. При этом число особей в популяции генетического алгоритма устанавливалось в диапазоне от 50 до 80. На каждом шаге работы алгоритма рассматривались

вектор параметров X и соответствующее ему значение векторного критерия $F(X)$.

В связи с тем что начальная популяция ГА формируется с использованием генератора случайных чисел, выполнялось несколько реализаций расчетов и выбирались лучшие из полученных решений. Результаты параметрического синтеза САР иллюстрируют рис. 2.3–2.5.

Построение фронта Парето, выполненное при оптимизации, приведено на рис. 2.3. На критериальной плоскости с осями координат $F_1(X)$ и $F_2(X)$ показана аппроксимация фронта Парето (границы множества Парето) – множество точек не улучшаемых решений для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$, полученных при оптимизации САР с помощью ГА. Особи генетического алгоритма – аппроксимация множества Парето векторных критериев, изображены в виде звездочек.

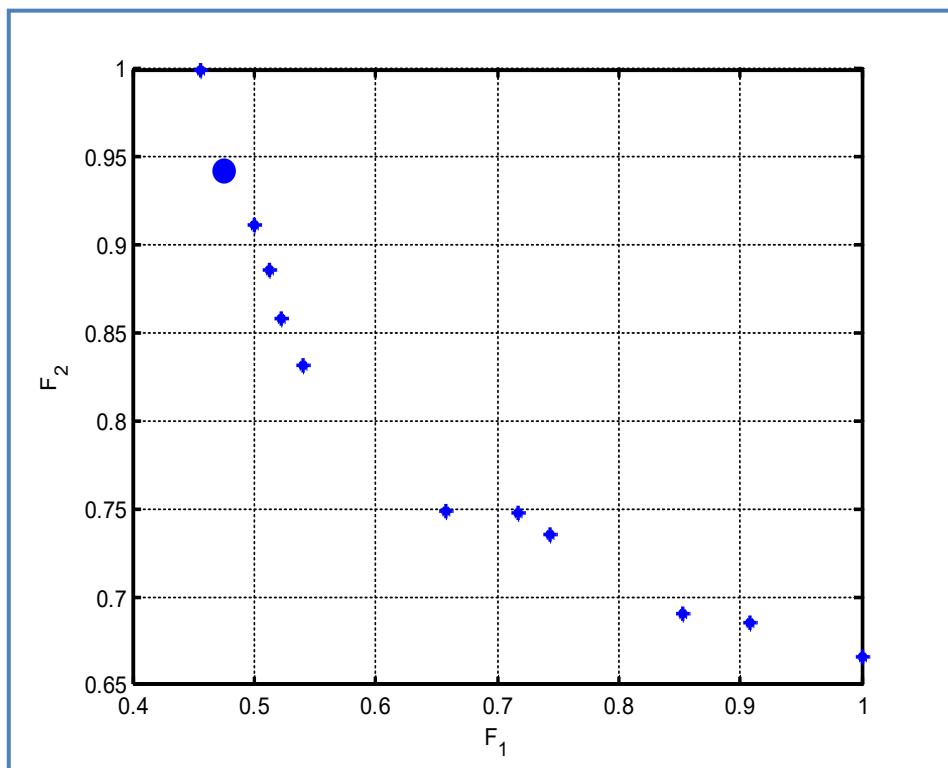


Рис. 2.3. Построение фронта Парето для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$

В результате привлечения дополнительного критерия $F_3(X)$ из множества точек Парето-оптимальных параметров САР для каждой реализации

выбрано единственное решение (выделено кружком), соответствующее минимуму критерия $F_3(X)$.

В данном случае минимум критерия $F_3(X)$ весьма близок к точке минимума критерия $F_1(X)$. Поэтому также близки динамические характеристики САР с параметрами, обеспечивающими минимизацию критериев $F_1(X)$ и $F_3(X)$. Следует отметить, что аналогичные результаты получены в большинстве реализации при оптимизации САР.

Графики переходных характеристик САР уровня (возмущение заданным значением регулируемого параметра) при минимизации критериев $F_1(X)$ – $F_3(X)$ приведены на рис. 2.4, а–в, соответственно.

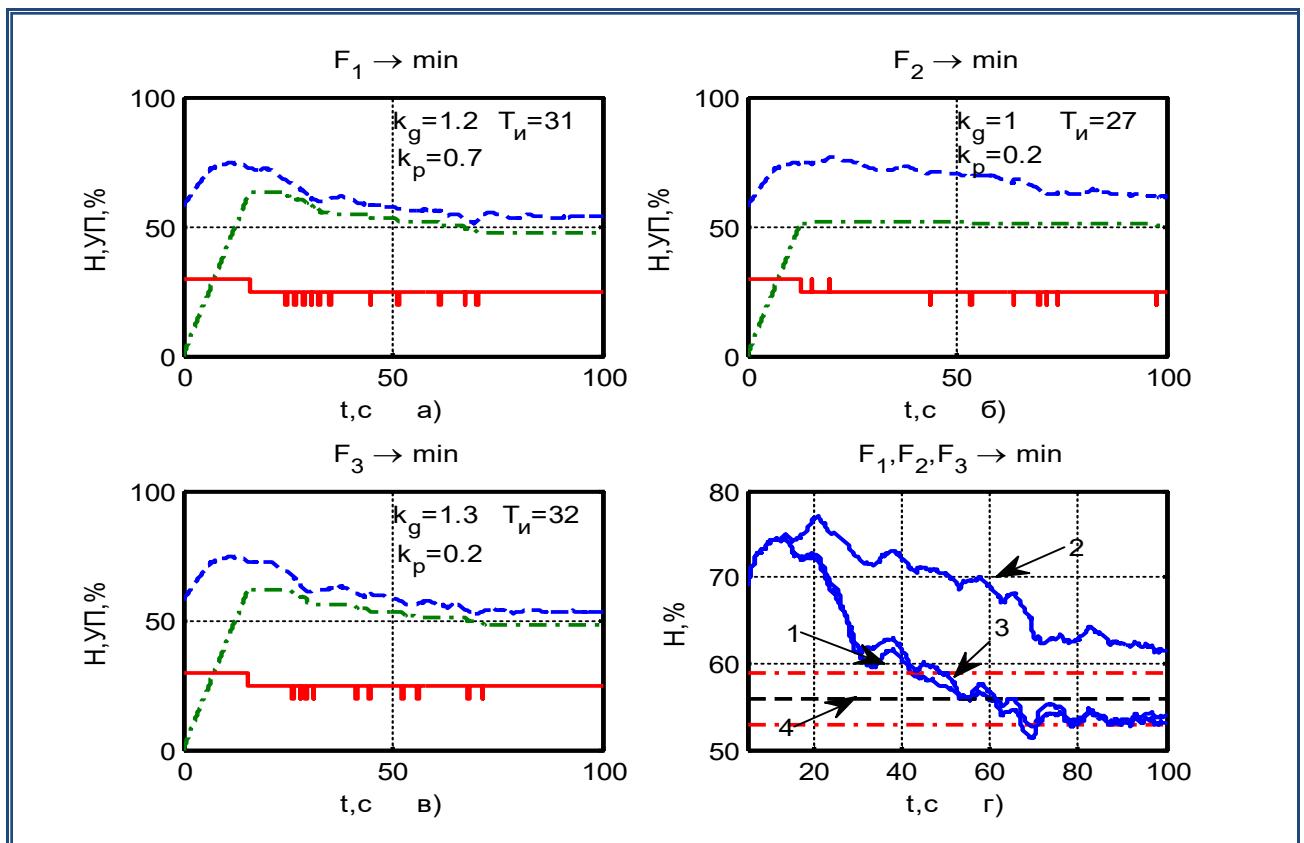


Рис. 2.4. Переходные процессы при оптимизации САР уровня

На графиках штриховая кривая соответствует регулируемому параметру – уровню воды, штрихпунктирная – положению РК, а непрерывная – импульсному выходу регулятора.

Для наглядности на рис. 2.4, *г*, сведены графики переходных процессов в увеличенном масштабе для регулируемых параметров всех трех случаев (кривая 1 – при $F_1 = \min$; 2 – при $F_2 = \min$; 3 – при $F_3 = \min$; 4 – заданное значение уровня). Здесь штрихпунктирные прямые соответствуют заданному уровню воды, а также пределам допустимого отклонения регулируемого параметра от заданного значения ($\pm 2\%$).

Как можно видеть, переходный процесс САР во всех рассматриваемых случаях характеризуется примерно одинаковым количеством срабатываний регулятора, обусловленным случайными пульсациями регулируемого параметра. Переходный процесс при минимальном значении $F_2(X)$ затянут во времени (рис. 2.4, *б*).

В то же время САР с параметрами, полученными при нахождении минимума критерия $F_3(X)$ (минимизируется количество включений ИМ) среди множества Парето-решений для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$, имеет динамические характеристики (рис. 2.4, *в*) примерно такие же, как и при минимизации критерия $F_1(X)$: на рис. 2.4, *г*, кривые 1 и 3 близки. Для этих случаев переходные процессы характеризуются хорошим качеством: при высоком быстродействии и в отсутствие перерегулирования имеется небольшое количество срабатываний регулятора.

Следует подчеркнуть, что коэффициент обратной связи k_g является наиболее существенным параметром настройки (обратная связь определяет общий коэффициент передачи регулятора). В связи с этим, его значения изменялись в более узком диапазоне, чем значения коэффициента передачи регулятора k_p и постоянной времени интегрирования T_i , которые слабее влияют на точность поддержания параметра.

Значения параметров САР при оптимизации выбирались из принятых диапазонов $k_p \in [0,1; 1]$, $T_i \in [10; 40]$, $k_g \in [0,1; 10]$.

В результате выполнения многокритериальной оптимизации определено, что минимизация только лишь критерия $\bar{F}_1(X) = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt$ позволяет получить требуемое качество работы САР уровня. То есть показана воз-

можность свести задачу многокритериальной оптимизации к задаче с единственным критерием, что упрощает расчеты в случае необходимости учитывать ограничения на область поиска оптимального решения САР уровня.

Зависимость функционала $F_1(X) = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt = F(k_p, T_u, k_g)$ от основного

параметра САР уровня – коэффициента обратной связи k_g , а также переходные процессы в САР при минимизации этого критерия представлены на рис. 2.5.

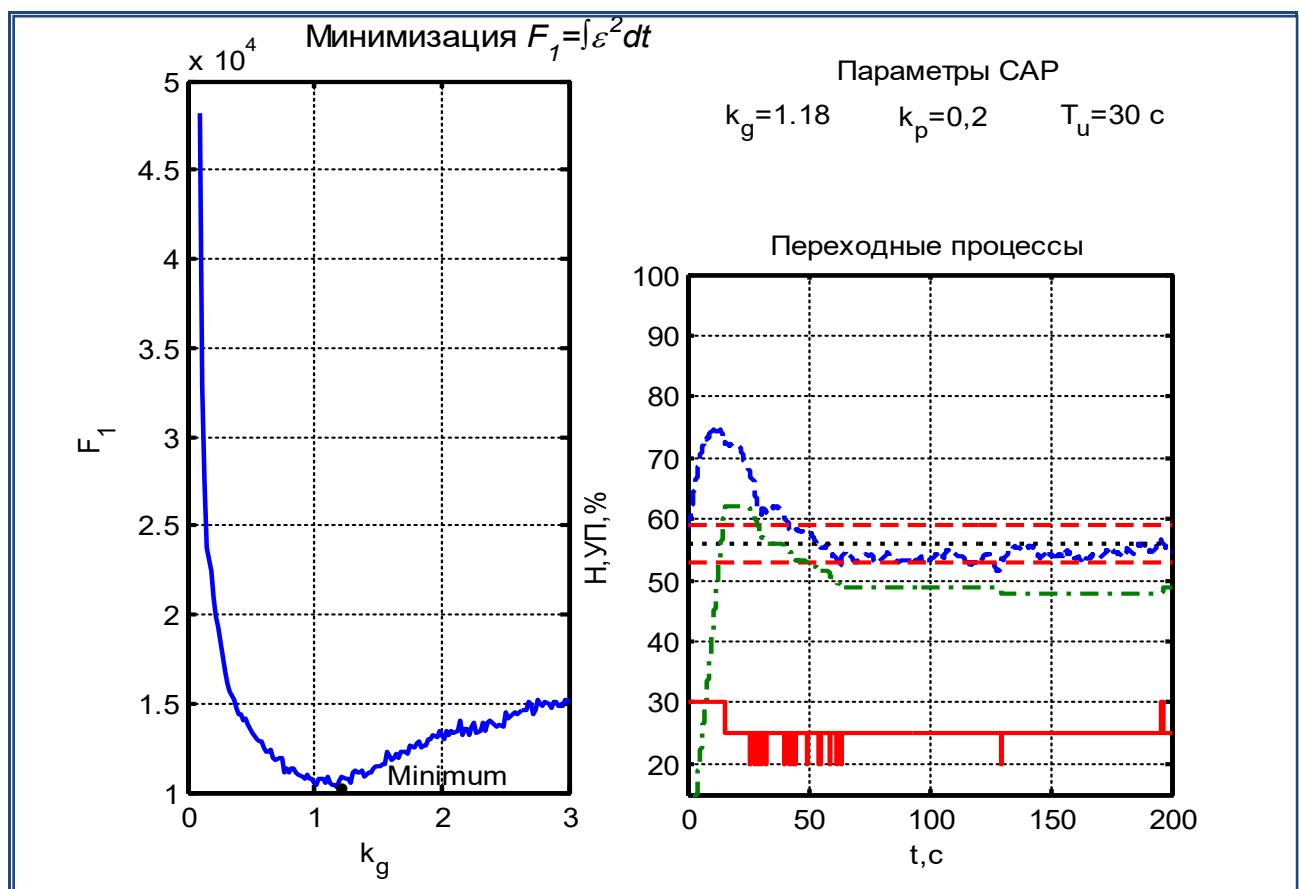


Рис. 2.5. Зависимость критерия $F_1 = F(k_p, T_u, k_g)$
от коэффициента обратной связи k_g
и переходные процессы в САР уровня при минимизации F_1

На графиках переходных процессов штриховая кривая соответствует регулируемому параметру – уровню воды, штрихпунктирная – положению РК, а непрерывная – импульсному выходу регулятора.

Пунктирная прямая соответствует заданному уровню воды, а штриховые прямые – пределам допустимого отклонения регулируемого параметра от заданного значения.

Полученные при оптимизации параметры настройки регулятора уровня представлены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

Параметры настройки регулятора уровня

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Значение
1. Коэффициент передачи регулятора	k_p , с/%	0,2
2. Постоянная времени интегрирования	T_u , с	30
3. Коэффициент обратной связи	k_g , %/% откр.	1,2
4. Постоянная времени демпфирования сигнала уровня	T_{fl} , с	3
5. Зона нечувствительности регулятора	Δ , %	2
6. Зона возврата регулятора	Δ_e , %	0,6
Критерий качества: $F_1(X) = \int_0^T \varepsilon^2(t) dt = F(k_p, T_u, k_g).$		

Эти оптимальные параметры регулятора уровня приняты в качестве исходных данных для анализа устойчивости контура регулирования.

2.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Задание. Определите оптимальные параметры настройки регулятора уровня (без учета флюктуаций – случайных возмущений (пульсаций) уровня).

Создайте в среде MATLAB / Simulink схему модели системы автоматического регулирования уровня в соответствии с рис. 2.6 (с использованием рис. 2.7–2.11). Значения скрытых параметров настройки указаны около блоков. Сохраните файл под именем a_reg_H15.slx.

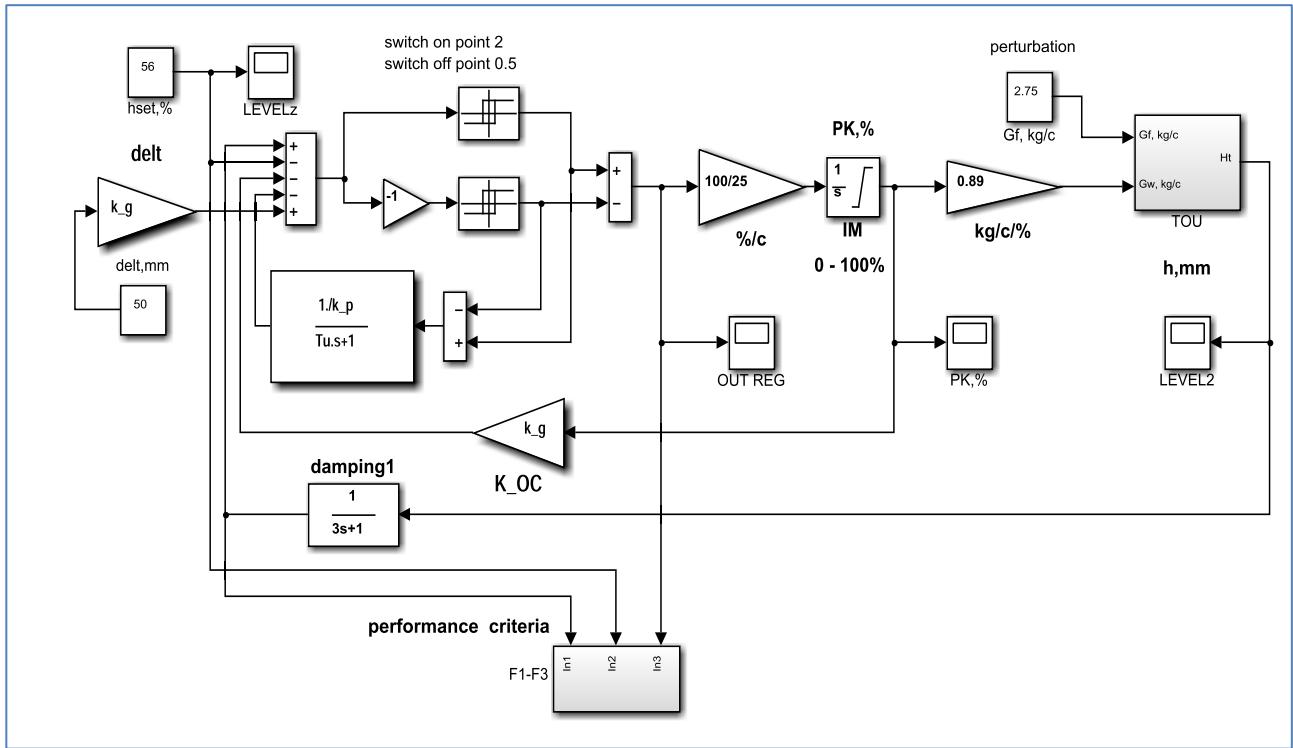


Рис. 2.6. Схема модели CAP уровня (файл a_reg_H15.slx)

При создании схемы (рис. 2.6) для вывода результатов расчета на соответствующие графики предусмотрите сохранение параметров в рабочую область, используя окна настройки соответствующих блоков Scope:

- 1) для текущего значения уровня – блок LEVEL2 (массив S1);
- 2) для заданного значения уровня – блок LEVELz (массив S2);
- 3) для положения регулирующего клапана – блок PK, % (массив po);
- 4) для выхода регулятора – блок OUT REG (массив y).

В окне настройки каждого блока, используя подменю History, надо выбрать пункт Save data to workspace, ввести имя соответствующего параметра, снять ограничение на количество накопленных значений и назначить формат Array (массив).

На рис. 2.7 приведена схема подсистемы TOU – модели объекта регулирования – уровня жидкости в резервуаре, вычисляемого как интеграл от разбаланса расходов на притоке и стоке. При создании схемы в настройках интегрирующего блока TOU1 необходимо задать ограничения (0 и 100 %), а также начальное значение выходного сигнала 59 мм.

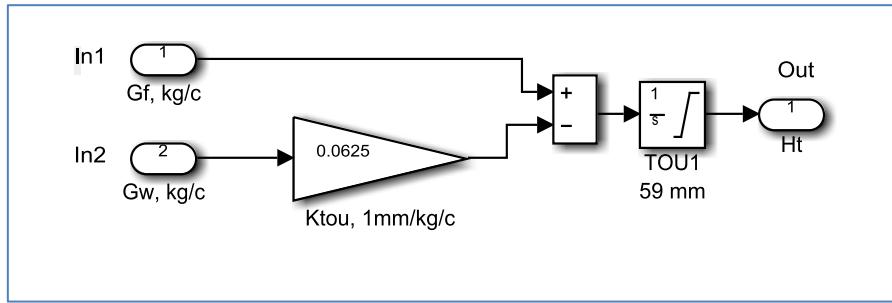


Рис. 2.7. Схема подсистемы TOU (модели канала регулирования уровня)

На рис. 2.8 приведена схема подсистемы performance criteria (вычисления критериев качества работы CAP). Схемы подсистем criterion 1–3 для вычисления критериев F_1 , F_2 и F_3 приведены на рис. 2.9–2.11.

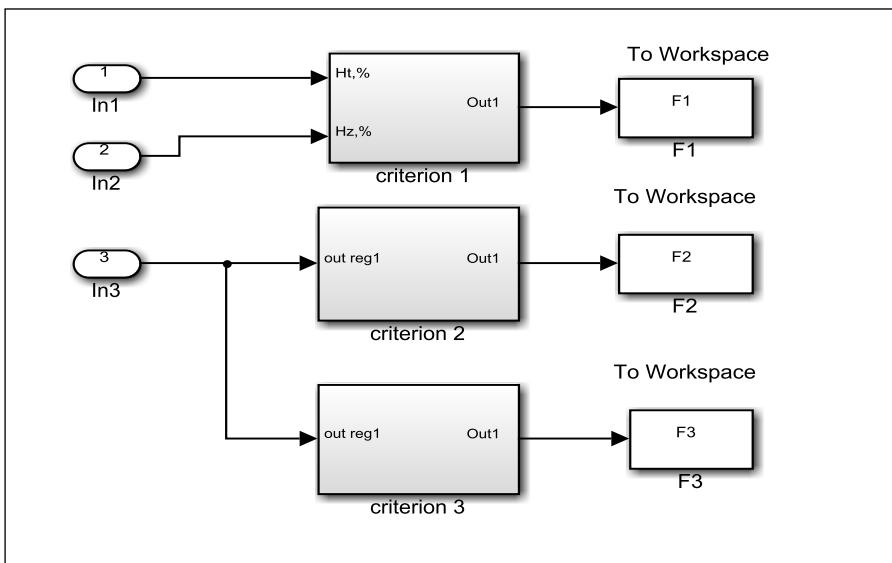


Рис. 2.8. Схема подсистемы performance criteria F_1 – F_3
(расчет критериев качества)

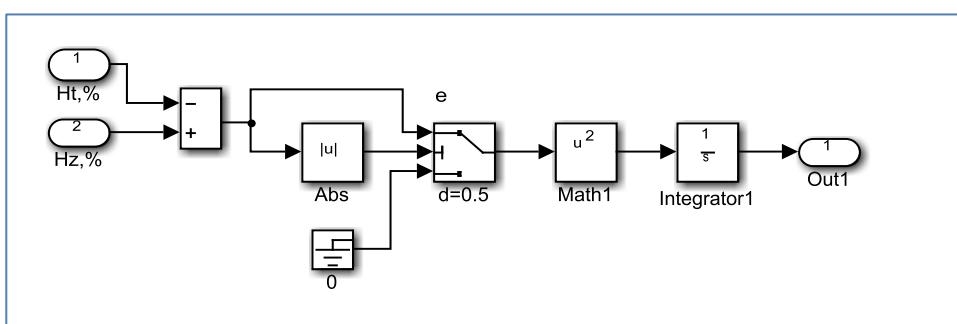


Рис. 2.9. Схема подсистемы criterion 1 (вычисления критерия качества F_1)

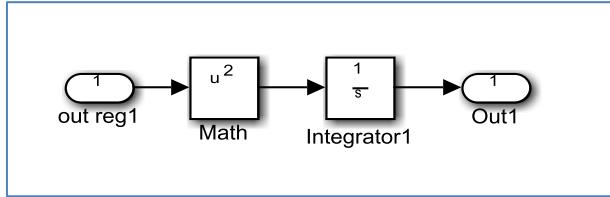


Рис. 2.10. Схема подсистемы criterion 2
(вычисления критерия качества F_2)

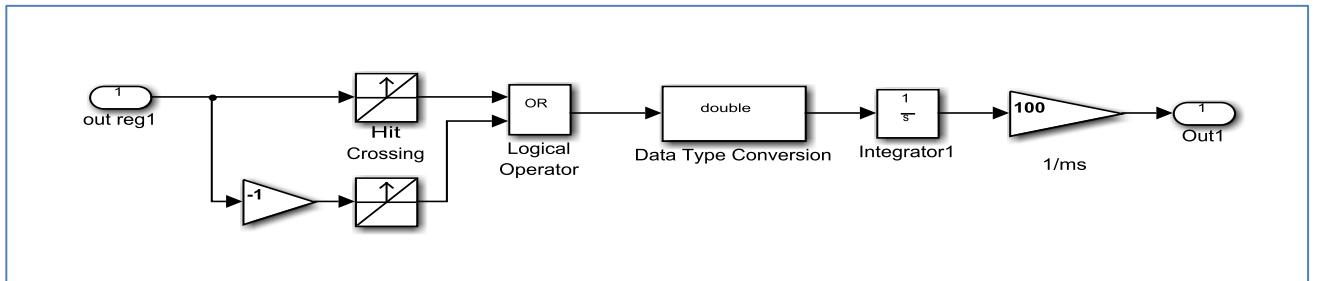


Рис. 2.11. Схема подсистемы criterion 3 (вычисления критерия качества F_3)

Подсистемы criterion 1–3 реализуют вычисления критериев качества работы системы $F_1 – F_3$ согласно выражениям (2.1)–(2.3) соответственно. Вычисленные значения критериев качества необходимо сохранять в рабочую область (см. блоки To Workspace на рис. 2.8). Для каждого из этих сохраняемых в рабочую область параметров надо указать его имя (F_1 , F_2 или F_3), а также назначить формат Array (для сохранения в виде массива вычисленных значений).

При создании схемы подсистемы criterion 3, выполняющей вычисления критерия F_3 (количество импульсов, формируемых регулятором, т. е. срабатываний ИМ РК), в настройках блоков Hit Crossing установите для формирования выходного параметра значение 0.5.

Назначьте время моделирования 500 с, переменный шаг счета и его максимальную величину 0.1 с, используя меню Simulation / Model Configuration Parameters.

Для расчета, оптимизации параметров, а также вывода результатов моделирования САР необходимо создать файлы, тексты которых приведены на рис. 2.12–2.14. Перечень функций и их параметров, применяемых для исследования системы, приведен в приложении (табл. П.1, П.3, П.4).

Создайте скрипт-файл для выполнения многокритериальной оптимизации параметров и многократного вызова модели САР уровня в соответствии с рис. 2.12 и сохраните под именем mulobj15_2.m.

```

clc
clear all
rng shuffle %
global k_p Tu k_g

open_system('a_reg_H15')
set_param('a_reg_H15/Transfer Fcn2', 'Numerator', '[1./k_p]')
set_param('a_reg_H15/Transfer Fcn2', 'Denominator', '[Tu 1]')
set_param('a_reg_H15/K_OC', 'Gain', 'k_g')
set_param('a_reg_H15/delt', 'Gain', 'k_g')
save_system('a_reg_H15')

% X = [k_p; Tu k_g]    ()
lb = [0.1 10 0.1]; % X
ub = [1.9 100 1.9]; % X

options = gaoptimset('PopInitRange',[lb;ub], 'PopulationSize',30);
options = gaoptimset(options, 'PlotFcns', {@gaplotpareto, @gaplotrankhist, ...
    @gaplotparetodistance, @gaplotscorediversity});
options = gaoptimset(options, 'TolFun', 1e-2, 'StallGenLimit', 5);
options.Display = 'iter'; %
options.Generations = 15; %

[x,fval,exitflag,output] = gamulti-
obj(@GoalFun1and2urov,3,[],[],[],[],lb,ub,options)

fprintf('The number of points on the Pareto front was: %d\n',
size(x,1));
fprintf('The average distance measure of the solutions on the
Pareto front was: %g\n', output.averagedistance);
fprintf('The spread measure of the Pareto front was: %g\n',
output.spread);
perpr_urov1

```

Рис. 2.12. Файл-сценарий для выполнения многокритериальной оптимизации параметров регулятора уровня (скрипт mulobj15_2.m)

Создайте файл-функцию (для расчета значений целевых функций оптимационной задачи – критериев качества F_1 и F_2) в соответствии с рис. 2.13 и сохраните под именем GoalFun1and2urov.m.

```

function Y = GoalFun1and2urov(x)
    % J(k_p, Tu)
    %
    global k_p Tu k_g
    k_p = x(1);
    Tu = x(2);
    k_g = x(3);
    %
    sim('a_reg_H15',150)
    Z = F1(end);
    Z1 = F2(end);
    Y(1)=Z;
    Y(2)=Z1;
    %
end

```

Рис. 2.13. Файл для расчета целевых функций F_1 и F_2
(файл-функция GoalFun1and2urov.m)

Создайте скрипт-файл для расчета и визуализации переходных процессов, а также вычисления целевой функции F_3 в соответствии с рис. 2.14 и сохраните под именем perpr_urov1.m.

```

% переходные процессы F1=min, F2=min, F3=min
open_system('a_reg_H15')
set_param('a_reg_H15/Transfer Fcn2', 'Numerator', '1./k_p')
set_param('a_reg_H15/Transfer Fcn2', 'Denominator', '[Tu 1]')
set_param('a_reg_H15/K_OC', 'Gain', 'k_g')
set_param('a_reg_H15/delt', 'Gain', 'k_g')
save_system('a_reg_H15')
% close_system('a_reg_H15')
[c,k] = min(fval,[],1);
k_p = x(k(1),1); Tu = x(k(1),2); k_g = x(k(1),3); sim('a_reg_H15',500)

figure;
subplot(2,2,1);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2),po(:,1),po(:,2), '--', y(:,1), 5.*y(:,2)+25);
set(hLines(1), 'LineWidth',2); set(hLines(2), 'LineWidth',2);
set(hLines(3), 'LineWidth',2)
axis([0 500 0 100]); grid on
title(' F_1 \rightarrow min', 'FontSize',10)

```

Рис. 2.14. Файл-сценарий для расчета переходных характеристик САР уровня
(скрипт perpr_urov1.m) (начало)

```

xlabel('t,c'), ylabel('H,УП,%'); set(gca, 'LineWidth', 2)
text(50, 65, ['T_и=', num2str(Tu)]);
text(50, 76, ['k_p=', num2str(k_p)])
text(50, 89, ['k_g=', num2str(k_g)])
subplot(2, 2, 4);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2),S2(:,1),S2(:,2), '--');
set(hLines(1), 'LineWidth', 2);
set(hLines(2), 'LineWidth', 2); grid on
axis([0 500 45 75]);
title(' F_1,F_2,F_3 \rightarrow min', 'FontSize', 10)
xlabel('t,c'), ylabel('H,%'); set(gca, 'LineWidth', 2); hold on
k_p = x(k(2),1); Tu = x(k(2),2); k_g = x(k(2),3);
sim('a_reg_H15', 500)
subplot(2, 2, 2);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2),po(:,1),po(:,2), '--', y(:,1), 5.*y(:,2)+25);
set(hLines(1), 'LineWidth', 2); set(hLines(2), 'LineWidth', 2);
set(hLines(3), 'LineWidth', 2)
axis([0 500 0 100]); grid on
title('F_2 \rightarrow min', 'FontSize', 10)
text(50, 65, ['T_и=', num2str(Tu)]);
text(50, 76, ['k_p=', num2str(k_p)])
text(50, 89, ['k_g=', num2str(k_g)])
xlabel('t,c'), ylabel('H,УП,%'); set(gca, 'LineWidth', 2)
subplot(2, 2, 4);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2)); set(hLines(1), 'LineWidth', 2);
% поиск F3=min
open_system('a_reg_H15')
set_param('a_reg_H15/Transfer Fcn2', 'Numerator', '[1./k_p]')
set_param('a_reg_H15/Transfer Fcn2', 'Denominator', '[Tu 1]')
set_param('a_reg_H15/K_OC', 'Gain', 'k_g')
set_param('a_reg_H15/delt', 'Gain', 'k_g')
save_system('a_reg_H15')
%
m = length(x);
for i = 1:m,
    k_p = x(i,1);
    Tu = x(i,2);
    k_g = x(i,3);
    sim('a_reg_H15', 500)
    Z22(i) = F3(end);
end

m1 = min(Z22)
[im] = find(Z22 == m1)
tu=x(im,2)

```

*Рис. 2.14. Файл-сценарий для расчета переходных характеристик САР уровня
(скрипт perpr_urov1.m) (продолжение)*

```

kp=x(im,1)
kg=x(im,3)
k_p = kp(1); Tu = tu(1); k_g = kg(1);sim('a_reg_H15',500)
%
subplot(2,2,3);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2),po(:,1),po(:,2),'--',y(:,1),5.*y(:,2)+25);
set(hLines(1), 'LineWidth',2);set(hLines(2), 'LineWidth',2);
set(hLines(3), 'LineWidth',2)
 xlabel('t,c'), ylabel('H, УП,%'); set(gca, 'LineWidth',2)
 axis([0 500 10 100]); grid on
title(' F_3 \rightarrow min', 'FontSize',10)
text(50,65,['T_и=',num2str(Tu)]);
text(50,76,['k_p=',num2str(k_p)])
text(50,89,['k_g=',num2str(k_g)])
subplot(2,2,4);
 hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2)); set(hLines(1), 'LineWidth',2);

```

Рис. 2.14. Файл-сценарий для расчета переходных характеристик САР уровня (скрипт perpr_urov1.m) (окончание)

Поместите все созданные файлы (mulobj15_2.m, GoalFun1and2urov.m, perpr_urov1.m, a_reg_H15.slx) в одну директорию. Вызовите на выполнение файл-сценарий mulobj15_2.m, осуществляющий многоократные вызовы Simulink-модели САР уровня a_reg_H15.slx.

При выполнении процедуры оптимизации параметров САР в окне Genetic Algorithm выводятся результаты работы многоцелевого генетического алгоритма (например, как на рис. 2.15), которые позволяют видеть построение фронта Парето (Pareto front) для целевых функций F_1 и F_2 на каждой итерации (поколении) ГА. Кроме того, в этом окне отображаются количество особей, составляющих фронт Парето (Number of individuals), и динамика разброса, т. е. среднего расстояния между решениями во фронте Парето в популяциях поколений при оптимизации (Distance of individuals). Также в окне Genetic Algorithm можно видеть гистограммы разнообразия оценок для каждой из целевых функций F_1 и F_2 (Score Histogram).

При оптимизации в командном окне на каждой итерации ГА выводятся текущие характеристики фронта Парето для целевых функций F_1 и F_2 (среднее расстояние между решениями и мера распространения фронта Парето).

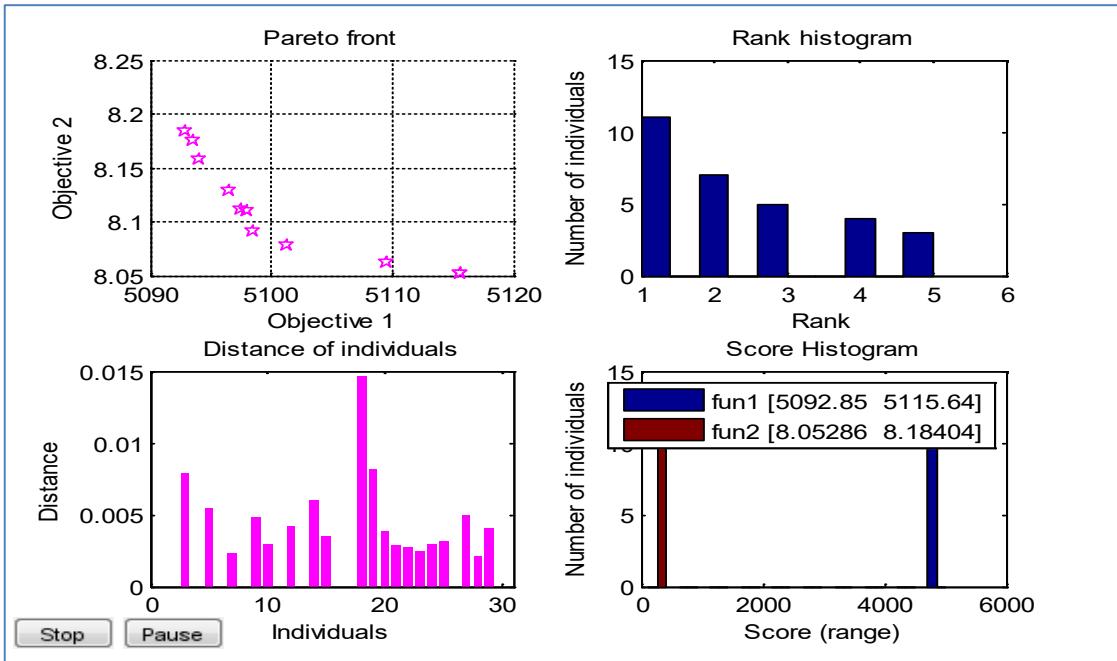


Рис. 2.15. Процесс оптимизации параметров регулятора уровня с помощью многоцелевого генетического алгоритма

На рис. 2.16 представлены графики переходных процессов в САР уровня с полученными оптимальными параметрами (для одной из реализаций).

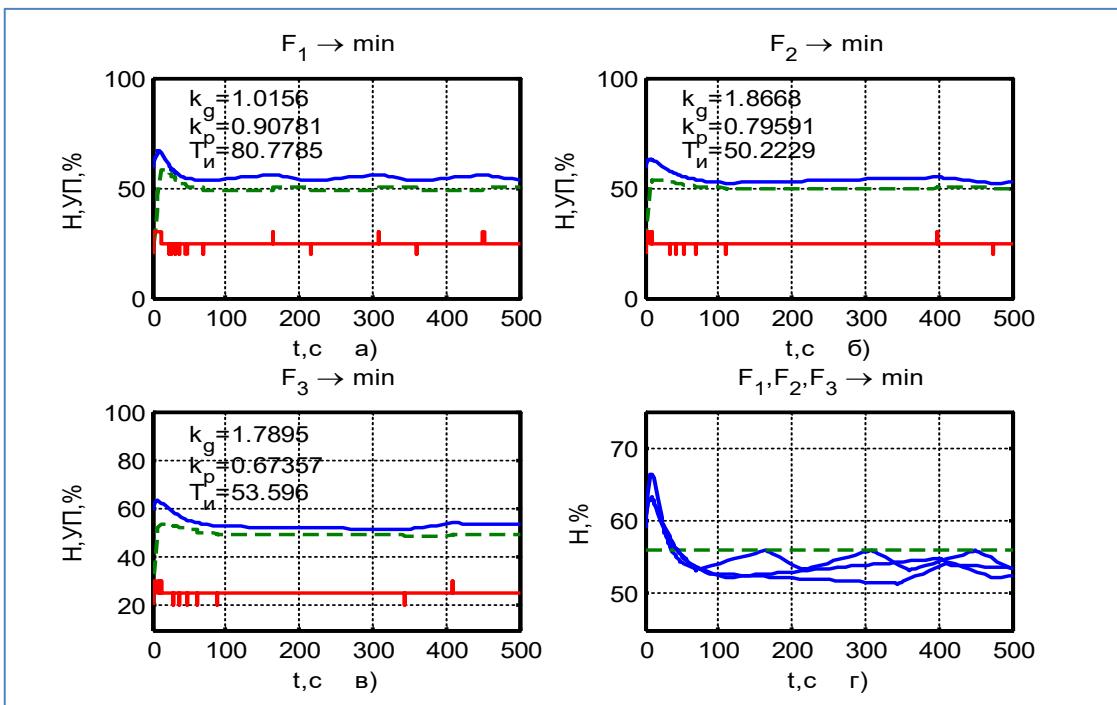


Рис. 2.16. Графики результатов расчета переходных характеристик САР уровня при оптимизации

Переходные процессы в системе с параметрами, соответствующими минимальному значению критерия F_1 , показаны на рис. 2.16, *a*, а критериев F_2 и F_3 – на рис. 2.16, *б* и *в*, соответственно.

Напомним, что минимум критерия F_3 находится среди множества Парето-решений для критериев F_1 и F_2 . Для наглядности графики изменения уровня сведены в увеличенном масштабе на рис. 2.16, *г*: видно, что поддержание заданного значения уровня производится во всех случаях с требуемой точностью, а количество срабатываний регулятора отличается. В этом случае рекомендуется выбрать параметры настройки, соответствующие минимальному значению критерия F_3 , обеспечивающего наименьшее число включений ИМ.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику объекта управления.
2. В чем заключается назначение системы управления?
3. Что понимается под улучшением качества процесса регулирования?
4. Опишите структуру и основные компоненты схемы модели САР уровня.
5. Как ставится задача многокритериальной оптимизации? Какие показатели приняты для оценки качества работы САР? Что означает оптимальное по Парето (или эффективное) решение?
6. Как производится оптимизация САР с помощью многоцелевого генетического алгоритма? В чем сущность и преимущества ГА?
7. После выполнения расчетов поясните полученные результаты.

2.5. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯТОРОВ УРОВНЯ

На основе разработанной математической модели САР уровня и оптимизации настроек выполняется анализ устойчивости регулятора. При этом надо решить следующие задачи:

- провести аппроксимацию используемого в САР релейно-импульсного регулятора линейным регулятором (для применения математического аппарата линейной теории анализа устойчивости);
- выполнить преобразования структурной схемы системы с аппроксимирующим линейным регулятором для получения эквивалентных передаточных функций по каналу задающего воздействия;
- вычислить полюса замкнутых систем и построить частотные годографы Найквиста;
- выполнить построение логарифмических частотных характеристик (диаграмм Боде) – амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и фазо-частотной характеристики (ФЧХ) с определением запасов устойчивости;
- исследовать устойчивость аппроксимирующих линейных регуляторов с учетом дискретизации в контуре регулирования.

Для расчета использовать значения параметров, полученные при моделировании и оптимизации системы (см. табл. 2.3).

Рассмотрим выполнение аппроксимации релейно-импульсного регулятора линейным регулятором.

В связи с тем что релейно-импульсный регулятор в скользящем режиме его работы подчиняется линейному закону регулирования [12, 17], функциональная связь между входным сигналом регулятора и положением рабочего органа исполнительного механизма описывается передаточной функцией $W(s)$ в соответствии со следующими выражениями:

$$W(s) = k_{\text{п}} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{п}} s} \right), \quad (2.4)$$

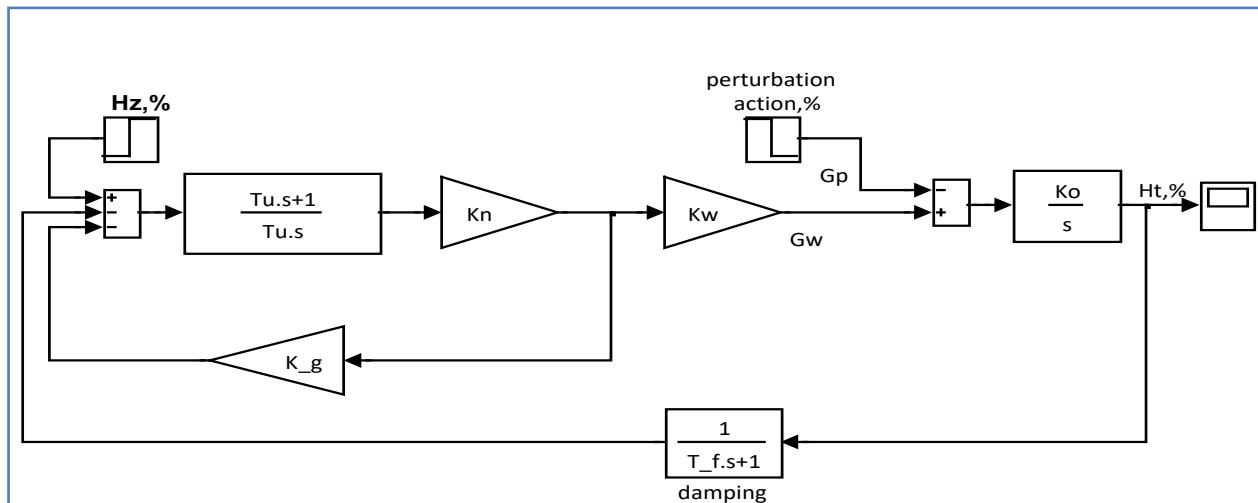
$$k_{\text{п}} = \frac{k_p T_{\text{п}} 100 \%}{T_{\text{им}}}. \quad (2.5)$$

Для анализа устойчивости нелинейный алгоритм релейно-импульсного регулятора совместно с исполнительным механизмом, являющимся интегрирующим звеном, следует аппроксимировать линейным ПИ-законом.

Коэффициенты передачи k_n линейного ПИ-регулятора и коэффициент передачи k_p эквивалентного ему исходного релейно-импульсного регулятора, реализующего ПИ-закон регулирования совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости, связаны зависимостью (2.5). То есть при принятых настройках релейно-импульсного регулятора (см. табл. 2.3) коэффициент передачи линейного ПИ-регулятора

$$k_n = \frac{0,2 \cdot 30 \cdot 100}{25} = 24 \% \text{ от kp}/\%.$$

Для анализа устойчивости контура регулирования уровня с линейным ПИ-регулятором использовалась схема модели (рис. 2.17), полученная из исходной схемы модели САР (см. рис. 2.1) с учетом линейной аппроксимации регулятора.



Rис. 2.17. Схема контура регулирования уровня с эквивалентным линейным ПИ-регулятором

Для получения передаточной функции регулятора уровня схема на рис. 2.17 представлена в виде, изображенном на рис. 2.18, а.

Передаточные функции, составляющие систему на рис. 2.18, а, следующие:

$$W_1(s) = \frac{k_n(T_n s + 1)}{T_n s}; \quad (2.6)$$

$$W_2(s) = k_g; \quad (2.7)$$

$$W_3(s) = \frac{k_w k_o}{(T_{fl}s + 1)s}. \quad (2.8)$$

На рис. 2.18, б, в, показано, каким образом реализована последовательность эквивалентных преобразований схемы регулятора уровня к простейшему виду:

1) сначала получена передаточная функция $W_4(s)$, эквивалентная соединению звеньев, состоящему из звена $W_1(s)$, охваченного отрицательной обратной связью со звеном $W_2(s)$ (рис. 2.18, б):

$$W_4(s) = \frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)}; \quad (2.9)$$

2) затем окончательно получена передаточная функция регулятора по каналу задающего воздействия:

$$W_5(s) = \frac{W_3(s)W_4(s)}{1 + W_3(s)W_4(s)} = \frac{W_1(s)W_3(s)}{1 + W_1(s)W_2(s) + W_1(s)W_3(s)}. \quad (2.10)$$

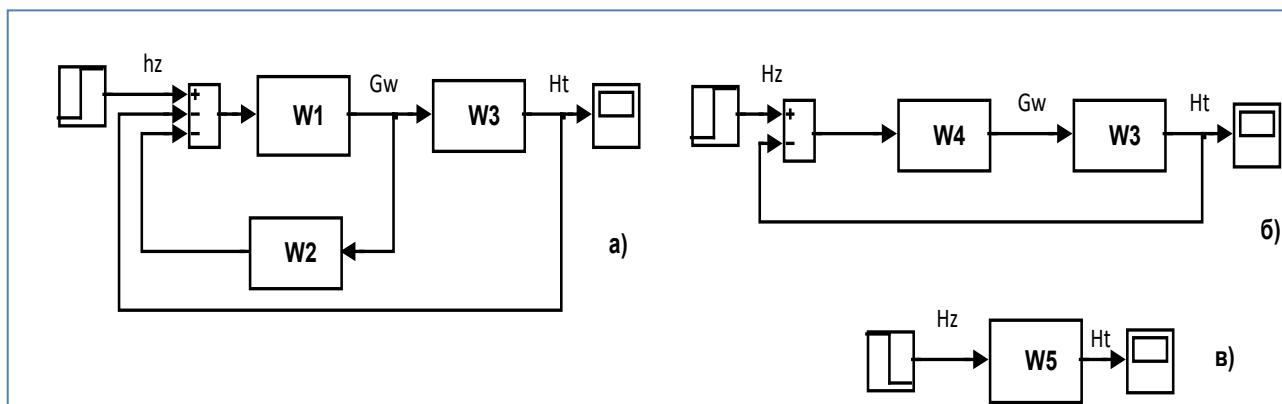


Рис. 2.18. Последовательность эквивалентных преобразований схемы регулятора уровня к простейшему виду

После учета в полученном выражении (2.10) передаточных функций (2.6)–(2.8) и подстановки принятых численных значений (см. табл. 2.3) получена передаточная функция замкнутой системы для регулятора уровня.

Передаточная функция замкнутой системы для регулятора уровня, а также вычисленные полюса передаточной функции приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4

**Передаточная функция замкнутой системы для регулятора уровня,
полюса передаточной функции**

Параметры	Передаточная функция регулятора уровня	Полюса передаточной функции
$k_{\text{п}} = 24 \text{ \% откр /%}; T_{\text{i}} = 30 \text{ с}; k_g = 1,3 \text{ %/(% откр)}; T_f = 3 \text{ с}$	$W_5(s) = \frac{120s^2 + 44s + 1,33}{2898s^3 + 1060s^2 + 71,25s + 1,33}$	- 0.29 -0.043 -0.038
$k_{\text{п}} = 24 \text{ \% откр /%}; T_{\text{i}} = 30 \text{ с}; k_g = 0,13 \text{ %/(% откр)}; T_f = 3 \text{ с}$	$W_5(s) = \frac{120s^2 + 44s + 1,33}{370,8s^3 + 133s^2 + 43,17s + 1,33}$	-0.16 + 0.28i -0.16 - 0.28i -0.03

Для сравнения в этой же таблице кроме расчетов при рекомендуемых параметрах регулятора, полученных при оптимизации ($k_{\text{п}} = 24 \text{ \% откр /%}; T_{\text{i}} = 30 \text{ с}; k_g = 1,3 \text{ %/(% откр)}; T_f = 3 \text{ с}$), приведены результаты при 10-кратном уменьшении коэффициента обратной связи ($k_g = 0,13 \text{ %/(% откр)}$).

В обоих рассмотренных случаях корни характеристического полинома (полюса) находятся в левой полуплоскости комплексной плоскости, что свидетельствует об устойчивости системы регулирования.

Анализ влияния дискретизации сигналов на устойчивость контура регулирования производился с помощью преобразования передаточной функции непрерывной системы регулирования в дискретную систему. При этом учитывалось, что период дискретизации t_0 при работе цифрового контроллера, реализующего алгоритм работы регулятора, в среднем равен 0,2 с.

Дискретная передаточная функция замкнутой системы для регулятора уровня по каналу задающего воздействия, а также вычисленные полюса дискретной системы для рассматриваемых вариантов параметров регулятора приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Дискретная передаточная функция замкнутой системы для регулятора уровня по каналу задающего воздействия, полюса передаточной функции

Параметры	Дискретная передаточная функция регулятора уровня	Полюса передаточной функции
$k_{\Pi} = 24\% \text{ откр /%; } T_{\Pi} = 30 \text{ с;}$ $k_g = 1,3\% /(\% \text{ откр}); T_f = 3 \text{ с}$	$W_s(z) = \frac{0,008z^2 + 0,016z + 0,0077}{z^3 - 2,92z^2 - 2,85z - 0,93}$	0.993 0.991 0.94
	$W_s(z) = \frac{0,065z^2 + 0,125z + 0,060}{z^3 - 2,93z^2 + 2,85z - 0,93}$	0.97 + 0.05i 0.97 - 0.05i 0.99
$k_{\Pi} = 24\% \text{ откр /%; } T_{\Pi} = 30 \text{ с;}$ $k_g = 0,13\% /(\% \text{ откр}); T_f = 3 \text{ с}$		

Полюса замкнутой дискретной системы остаются внутри единичной окружности для обоих вариантов, что свидетельствует об устойчивости системы регулирования.

2.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

Задание. Выполните анализ устойчивости регулятора уровня. Создайте скрипт-файл в среде MATLAB в соответствии с рис. 2.19 и сохраните под именем UST_23urov.m. Перечень функций, применяемых для исследования системы, приведен в приложении (табл. П.2–П.3).

```
%Анализ устойчивости цифровой системы регулирования (уровень)
%формирование tf-модели в виде передаточной функции
clc;
clear all
%
koc=1.3; kw=0.89; Tu=30; kn=24.0; k=0.0625;
sys1=tf([30*24 24],[ 30 0]);% модель ПИ-регулятора (ПД+ШВ)
sysd=tf([1],[ 3 1]);% модель демпфера
sysoc=koc; sys4=feedback(sys1,sysoc)%обратная связь регулятора
sys2=kw;% модель Gw
sys3=tf([0.0625],[1 0]);% модель объекта
```

Рис. 2.19. Сценарий для исследования устойчивости регулятора уровня (файл-скрипт UST_23urov.m) (начало)

```

sys5=series(sys4,kw)%последовательное соединение с моделью Gw
%разомкнутая система sys71
sys6=series(sys5,sys3);%последовательное соединение с моделью
%объекта
sys71=series(sys6,sysd)%последовательное соединение с моделью
%объекта и демп
sys7=feedback(sys6,sysd)%обратная связь (замкнутой системы)
    pole(sys7)%вычисление полюсов замкнутой системы
% разомкнутая система sys71 par
% sys91=series(sys5,sysd);%последовательное соединение ос
% sys9=feedback(sys3,sys91)%обратная связь (замкнутой системы)
%     pole(sys9)%вычисление полюсов замкнутой системы
sys7d=c2d(sys7,0.2)
pole(sys7d)%вычисление полюсов замкнутой системы
sys71d=c2d(sys71,0.2)
%10-кратное уменьшение кос
koc=1.3/10;sysd=tf([1],[ 3 1]);% модель демпфера
sysoc=koc;sys41=feedback(sys1,sysoc)%обратная связь регулятора
sys51=series(sys41,kw);%последовательное соединение с моделью Gw
%разомкнутая система sys81
sys61=series(sys51,sys3);%последовательное соединение с моделью
%объекта
sys81=series(sys61,sysd)%последовательное соединение с моделью
%объекта и демпфером
sys8=feedback(sys61,sysd)%обратная связь (замкнутой системы)
    pole(sys8)%вычисление полюсов замкнутой системы
        sys8d=c2d(sys8,0.2)
        sys81d=c2d(sys81,0.2)
    pole(sys8d)%вычисление полюсов замкнутой системы

    figure
nyquist(sys71,sys81,sys71d,'--',sys81d,'--'),grid
%годограф Найквиста

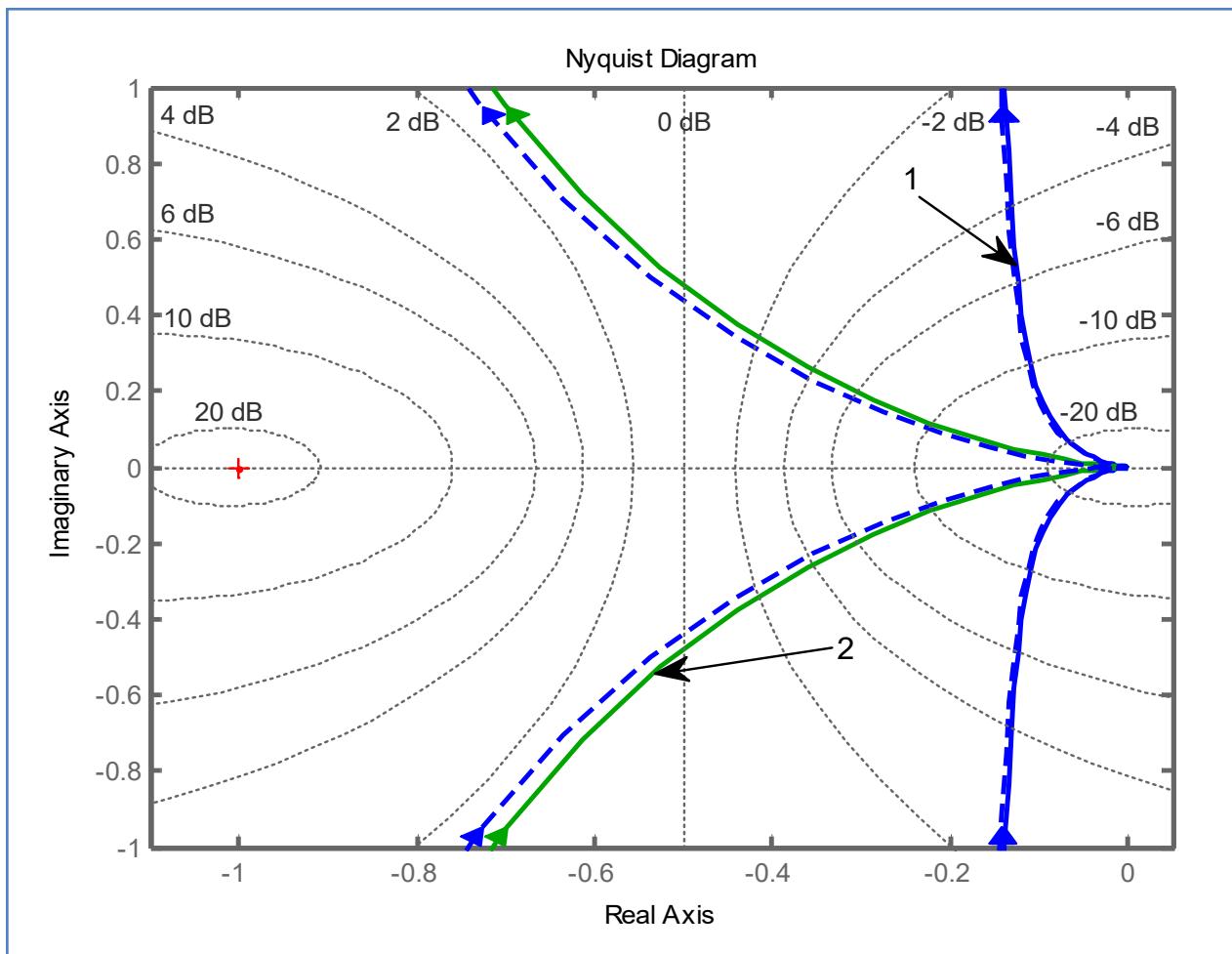
set(gca,'LineWidth',2)
axis([-1.1 0.05 -1. 1. ])
% title(['Gm=',num2str(Gm),'; Pm=',num2str(Pm)]);
figure
% subplot(2,1,1),
bode(sys7d,'--',sys7,{0.01,100}),grid;%диаграммы Боде
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(sys7);[Gm1,Pm1,Wcg,Wcp]=margin(sys7d);
title(['Gm=',num2str(Gm),'; Pm=',num2str(Pm),'
Gm1=',num2str(Gm1),'; Pm1=',num2str(Pm1),'
a']);
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(sys8);[Gm1,Pm1,Wcg,Wcp]=margin(sys8d);
title(['Gm=',num2str(Gm),'; Pm=',num2str(Pm),'
Gm1=',num2str(Gm1),'; Pm1=',num2str(Pm1),'
b']);

```

*Рис. 2.19. Сценарий для исследования устойчивости регулятора уровня
(файл-скрипт UST_23urov.m) (окончание)*

Запустите на выполнение скрипт `UST_23urov.m` и выполните построение частотных характеристик системы регулирования уровня для подтверждения полученных результатов (см. табл. 2.4 и 2.5) при исследовании устойчивости системы на основе определения полюсов передаточных функций.

Поясните, какая команда используется для построения диаграмм Найквиста, приведенных на рис. 2.20.



*Rис. 2.20. Частотные годографы Найквиста непрерывной (сплошная линия) и дискретной (штриховая линия) системы с регулятором уровня:
1 – при $k_{\text{пп}} = 24 \%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 30 \text{ с}$; $k_g = 1,3 \%/(\% \text{ откп})$; $T_f = 3 \text{ с}$;
2 – $k_{\text{пп}} = 24 \%$ откп /%; $T_{\text{и}} = 30 \text{ с}$; $k_g = 0,13 \%/(\% \text{ откп})$; $T_f = 3 \text{ с}$*

Отметим, что при построении диаграмм (годографов) Найквиста (рис. 2.20) использованы выбранные оптимальные параметры регулятора ($k_{\text{пп}} = 24 \%$ откп /%; $T_{\text{и}} = 30 \text{ с}$; $k_g = 1,3 \%/(\% \text{ откп})$; $T_f = 3 \text{ с}$). Также расчеты

проводятся и при 10-кратном уменьшении коэффициента обратной связи ($k_g = 0,13\% / (\% \text{ отк})$).

Поясните построенные с помощью скрипта `UST_23urov.m` частотные годографы Найквиста, которые реализованы для непрерывной (сплошная линия) и дискретной (штриховая линия) разомкнутых систем регулирования.

Изучите полученные диаграммы и убедитесь, что даже при таком уменьшении коэффициента обратной связи относительно рекомендуемого значения система остается устойчивой – годограф Найквиста не охватывает критическую точку $(-1, j0)$ на комплексной плоскости.

Поясните построенные с помощью скрипта `UST_23urov.m` логарифмические частотные характеристики (диаграммы Боде) разомкнутой системы регулирования уровня, приведенные на рис. 2.21.

Поясните, каким образом на основе диаграмм Боде определены запасы устойчивости по модулю и по фазе.

Отметим, что диаграммы Боде ставят в соответствие критической точке $(-1, j0)$ диаграммы Найквиста значения 0 дБ для модуля амплитудно-частотной характеристики и минус 180° для фазового сдвига фазочастотной характеристики.

Для анализа относительной устойчивости системы производится расчет запасов устойчивости системы по амплитуде G_m и по фазе P_m . Запас устойчивости системы по амплитуде G_m показывает, во сколько раз нужно увеличить коэффициент усиления системы, чтобы она стала неустойчивой. Запас устойчивости системы по фазе P_m характеризует колебательность системы: чем больше запас по фазе, тем меньше колебательность, тем меньше перерегулирование.

Следует иметь в виду, что система с недостаточным запасом устойчивости по фазе имеет значительно выраженные колебательные переходные процессы, что является нежелательным с точки зрения обеспечения ее технологической работоспособности.

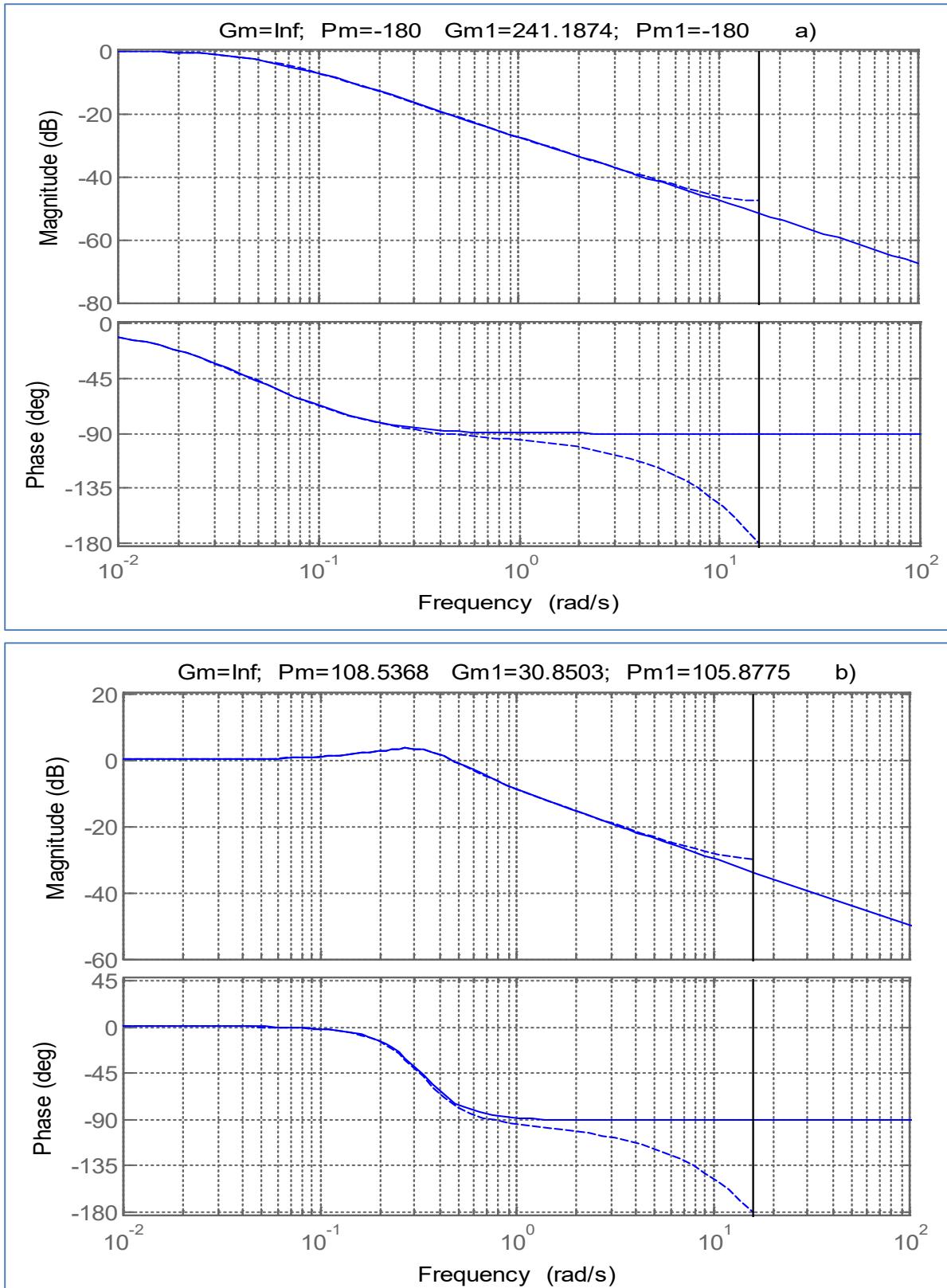


Рис. 2.21. Определение запасов устойчивости для непрерывной (сплошная линия) и дискретной (штриховая линия) системы регулирования уровня:

а – при $k_{\pi} = 24 \%$ откр /%; $T_i = 30$ с; $k_g = 1,3 \%/(\% \text{ откр})$; $T_f = 3$ с;

б – при $k_{\pi} = 24 \%$ откр /%; $T_i = 30$ с; $k_g = 0,13 \%/(\% \text{ откр})$; $T_f = 3$ с

Сравните полученные при выполнении скрипта UST_23urov.m рисунки с графиками на рис. 2.21. Убедитесь, что на полученных частотных характеристиках указаны запасы устойчивости для системы с рекомендуемыми параметрами регулятора: $k_{\pi} = 24\%$ откр /%; $T_i = 30$ с; $k_g = 1,3\%/(%\text{откр})$; $T_f = 3$ с, и при 10-кратном уменьшении коэффициента обратной связи ($k_g = 0,13\%/(%\text{откр})$).

Убедитесь, что в обоих случаях для непрерывной системы (непрерывная линия) фазочастотная характеристика, асимптотически приближаясь к значению минус 180° , не достигает его, поэтому запас устойчивости системы по амплитуде G_m не ограничен ($G_m = \inf$).

Как можно видеть, на частоте, при которой модуль амплитудно-частотной характеристики имеет значение 0 дБ, по имеющемуся фазовому сдвигу определен запас устойчивости системы по фазе P_m . Он составил: $P_m = 180^\circ$ для рекомендованной величины коэффициента обратной связи $k_g = 1,3\%/(%\text{откр})$ и $P_m = 108,5^\circ$ при уменьшении коэффициента обратной связи в 10 раз, т. е. при $k_g = 0,13\%/(%\text{откр})$.

В случае 10-кратного уменьшения коэффициента обратной связи k_g для дискретной системы запасы устойчивости системы по амплитуде и фазе уменьшились ($G_{m1} = 30,9$; $P_{m1} = 105,9^\circ$), оставаясь в принятом на практике диапазоне.

Запас устойчивости системы по фазе P_m уменьшился при уменьшении коэффициента обратной связи, но остался достаточным: на практике принимается, что запас устойчивости по фазе должен быть не хуже $30\text{--}60^\circ$ для обеспечения технологической работоспособности системы.

Однако следует иметь в виду, что расчеты выполнены для линеаризованных систем, в реальных системах из-за наличия нелинейностей при значительном уменьшении коэффициента обратной связи относительно рекомендуемого значения возможно возникновение автоколебательных режимов. Поэтому в качестве исходных значений настроек параметров следует принять рекомендованные величины (см. табл. 2.1).

Контрольные вопросы

1. Какие функции реализованы скриптом-файлом UST_23urov.m?
2. По каким правилам выполняются преобразования структурных схем линейных САР? Как подтвердить эквивалентность преобразованной и исходной схем системы?
3. Раскройте понятие устойчивости системы регулирования.
4. Как по виду корней характеристического уравнения оценить устойчивость системы?
5. Поясните построенные с помощью MATLAB логарифмические частотные характеристики. Как по ним оцениваются запасы устойчивости САР по модулю и по фазе?
6. Как строятся частотные годографы Найквиста?
7. Влияет ли период дискретизации цифровой системы регулирования на ее устойчивость? Поясните это влияние, используя полученные частотные характеристики.
8. После выполнения расчетов поясните результаты анализа устойчивости контура регулирования.

3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ

3.1. Подготовка исходных данных для моделирования

Перечень регуляторов и характеристики контуров регулирования давления для ТА-1 приведены в табл. 3.1. Регуляторы давления, входящие в состав ПТК САР МЗ, формируют управляющие воздействий на электроприводы регулирующих клапанов. При этом реализуется:

- поддержание заданного давления с требуемой точностью (указана в табл. 3.1);
- импульсное регулирование по пропорционально-интегральному (ПИ) закону регулирования совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости.

Таблица 3.1

Перечень регуляторов давления ТА-1

№ п/п	Наименование регулятора	Диапа- zon датчика, кгс/см ²	Наименование технологи- ческое	Наименование регулирующего клапана	Заданное значение и точность поддержания, кгс\см ²
1	Регулятор давления пара на уплотнения ЦВД (ЦНД) ТА-1	0–1	1РДУЦВД (1РДУЦНД)	Клапан регулято- ра давления в коллекторе подачи пара на уплотнения ЦВД (ЦНД) ТА-1	0,1–0,3
2	Регулятор давления пара в деаэраторе 1 («Р» в коллекторе 6 ата)	0–16	1РД-6	Клапан регулято- ра давления пара в деаэраторе № 1	$5 \pm 0,1$
3	Регулятор давления пара в деаэраторе 1Д-6 ата от коллектора 7 ата («Р» в коллекторе 7 ата)	0–16	1РД-9	Клапан регулято- ра давления пара в деаэраторе 1Д-6 ата от коллектора 7 ата	5,7–6

№ п/п	Наименование регулятора	Диапа- zon датчика, кгс/см ²	Наименование технологи- ческое	Наименование регулирующего клапана	Заданное значение и точность поддержания, кгс\см ²
4	Регулятор давления (Быстродействую- щая редукционная установка собствен- ных нужд)	0–16	БРУ-СН-1 БРУ-СН-2	Клапан быстро- действующей редукционной установки собст- венных нужд	5,6–6

В связи с тем, что рассматриваемые в проекте системы регулирования давления значительно отличаются своими динамическими характеристиками, расчеты проведены отдельно для малоинерционных систем (регулирование давления пара в деаэраторе) и систем со значительной инерционностью (регулирование давления пара на уплотнения ЦНД, на уплотнения ЦВД, БРУ-СН). В табл. 3.2 приведены параметры объекта управления, используемые при расчетах параметров контуров регулирования давления.

Таблица 3.2

Параметры объекта управления

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение и размерность	Значение (диапазон)	Примечание
1	Заданное значение давления	$P_{зад}$, % P_{max}	От 30 до 50	
2	Время открытия клапана регулирующего	$T_{им}$, с	25	
3	Коэффициент передачи объекта	K_o , % /%откр	0,1*	
4	Постоянная времени объекта	T_o , с	От 30 до 40* От 3 до 4*	регуляторы давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД); БРУ-СН регуляторы давления пара в деаэраторе

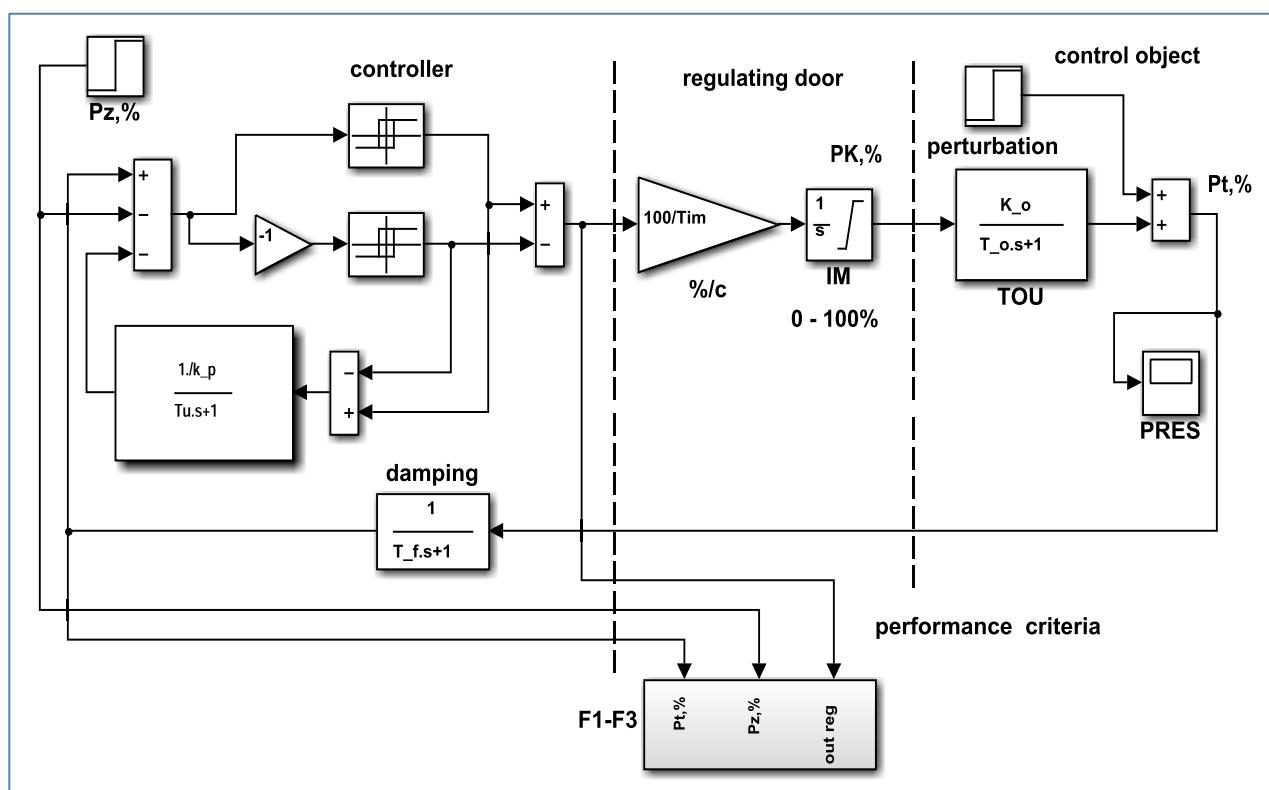
* Вследствие отсутствия данных приняты предположительные значения

Величина заданного значения давления для всех регуляторов задавалась в процентах от максимального значения диапазона изменения регулируемого параметра (P_{\max}).

3.2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Регулятор давления реализует одноимпульсную систему регулирования: на вход регулятора подается сигнал измеренного давления.

В интерактивной среде для выполнения научных и инженерных расчетов MATLAB с расширением Simulink разработана математическая модель САР давления (рис. 3.1), которая в свою очередь содержит модели: регулятора давления (controller), исполнительного механизма (IM) с регулирующим питательным клапаном (regulating door) и технологического объекта управления (control object).



*Rис. 3.1. Схема моделирования контура регулирования давления
в среде MATLAB/Simulink*

В регуляторе давления используется традиционный способ регулирования, применяемый в системах регулирования параметров теплоэнергетических процессов с исполнительными механизмами постоянной скорости, который реализуется в контроллере.

Сигнал рассогласования на входе в регулятор давления формируется как разность сигналов заданного и текущего значений давления. Демпфирование пульсаций в измерительном канале сигнала давления осуществляется инерционным звеном первого порядка.

Регулирующий клапан, снабженный ИМ, представлен усилительным звеном для реализации коэффициента передачи ($100\% \text{откр}/T_{им}$), учитывающим время открытия клапана $T_{им} = 25$ с, и интегрирующим звеном с ограничением от 0 до 100 % открытия.

Объект управления – канал «положение регулирующего клапана – давление», представлен инерционным звеном первого порядка (коэффициент передачи объекта K_o и постоянная времени T_o приведены в табл. 3.2).

Постоянная времени демпфирования T_f принимается из рекомендуемого на практике диапазона от 1 до 5 с.

Основными параметрами настройки регулятора являются коэффициент передачи k_p и постоянная времени интегрирования T_i . Содержащее указанные параметры звено на рис. 3.1 выделено тенью. Выбор указанных параметров осуществлялся при оптимизации.

Кроме того, в модели выполняется расчет интегральных показателей качества регулирования (performance criterion). При моделировании вычисляются квадратичные интегральные критерии $\bar{F}_i(X)$, $i = \overline{1,3}$, так же как и для контура регулирования уровня, в соответствии с выражениями (2.1)–(2.3).

Необходимо выполнить оптимизацию САР давления, то есть найти такие значения параметров k_p , T_i , которые минимизируют принятые показатели $\bar{F}_i(X)$, $i = \overline{1,3}$ для обеспечения быстродействия, отсутствия перeregулирования и уменьшения числа срабатываний ИМ.

3.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ

Задача оптимизации регуляторов давления поставлена и решена как многокритериальная с помощью того же подхода, как и для регуляторов уровня (изложен в п. 2.3).

Для построения множества Парето-решений и моделирования исследуемой САР давления использовались созданные для этого m-файлы – сценарии системы MATLAB, выполняющие многократные вызовы Simulink-модели САР давления (см. рис. 3.1), установку необходимых опций многоцелевого ГА и контроль выполнения оптимизации. Поиск множества Парето-решений выполнялся процедурой *gamultiobj* многоцелевого генетического алгоритма системы MATLAB.

Для получения результатов требовалось от 5 до 20 поколений ГА. В связи с тем, что при оптимизации САР осуществлялся поиск параметров k_p , T_i , доставляющих минимум векторному критерию оптимальности $F(X) = F(k_p, T_i)$, то для использования генетического алгоритма в качестве «особи» принят вектор параметров $X = (k_p, T_i)$. При этом число особей в популяции генетического алгоритма устанавливалось в диапазоне от 30 до 50. На каждом шаге работы алгоритма рассматривались вектор параметров X и соответствующее ему значение векторного критерия $F(X)$.

С учетом того, что начальная популяция ГА формируется с использованием генератора случайных чисел, выполнялось несколько реализаций расчетов и выбирались лучшие из полученных решений.

Так как рассматриваемые системы регулирования давления значительно отличаются своими динамическими характеристиками, расчеты проведены отдельно для малоинерционных систем и систем со значительной инерционностью.

Результаты параметрического синтеза САР давления пара в деаэраторе (малоинерционной системы) иллюстрируют рис. 3.2 и 3.3. Построение фронта Парето, выполненное при оптимизации, приведено на рис. 3.2.

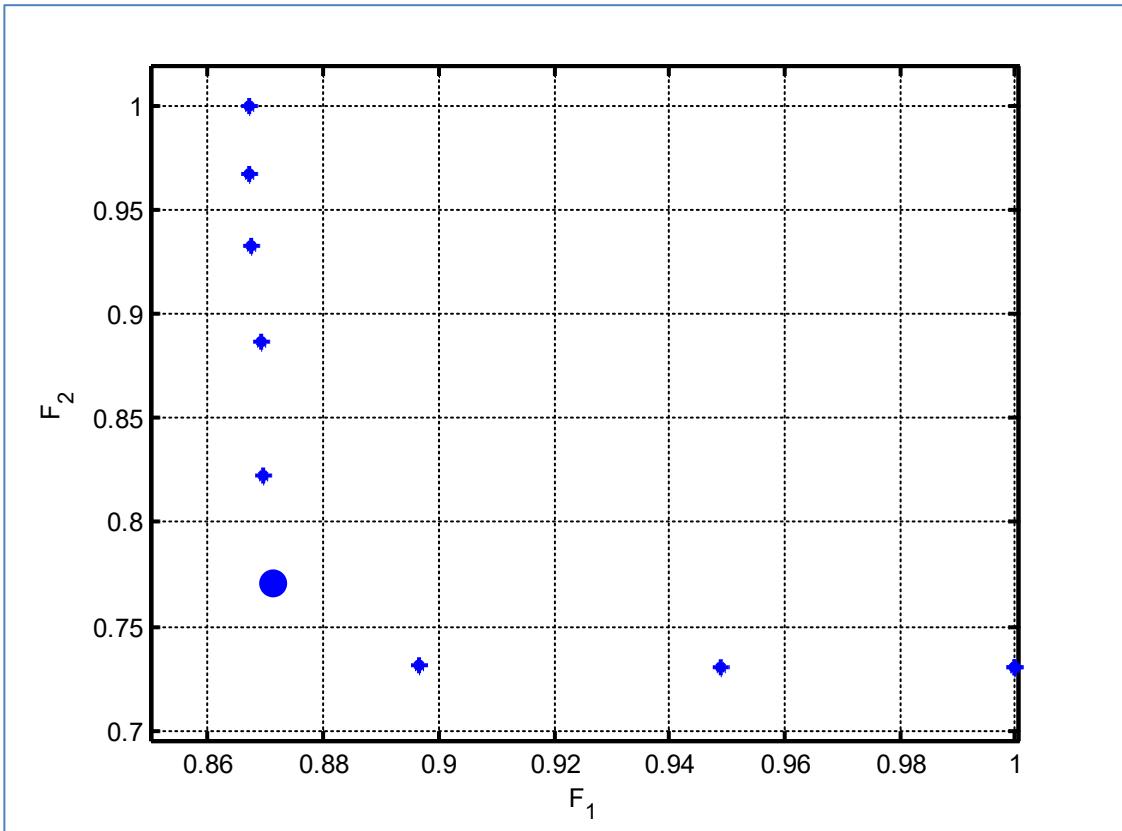


Рис. 3.2. Построение фронта Парето для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$ при оптимизации САР давления пара в деаэраторе

На критериальной плоскости с осями координат $F_1(X)$ и $F_2(X)$ показана аппроксимация фронта Парето (границы множества Парето) – множество точек не улучшаемых решений для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$, полученных при оптимизации САР с помощью ГА. Особи генетического алгоритма – аппроксимация множества Парето векторных критериев, изображены в виде звездочек.

В результате привлечения дополнительного критерия $F_3(X)$ из множества точек Парето-оптимальных параметров САР для каждой реализации выбрано единственное решение (выделено кружком), соответствующее минимуму критерия $F_3(X)$.

Графики переходных характеристик САР давления пара в деаэраторе (возмущение заданным значением регулируемого параметра) при минимизации критериев $F_1(X) – F_3(X)$ приведены на рис. 3.3, *a–e*, соответственно.

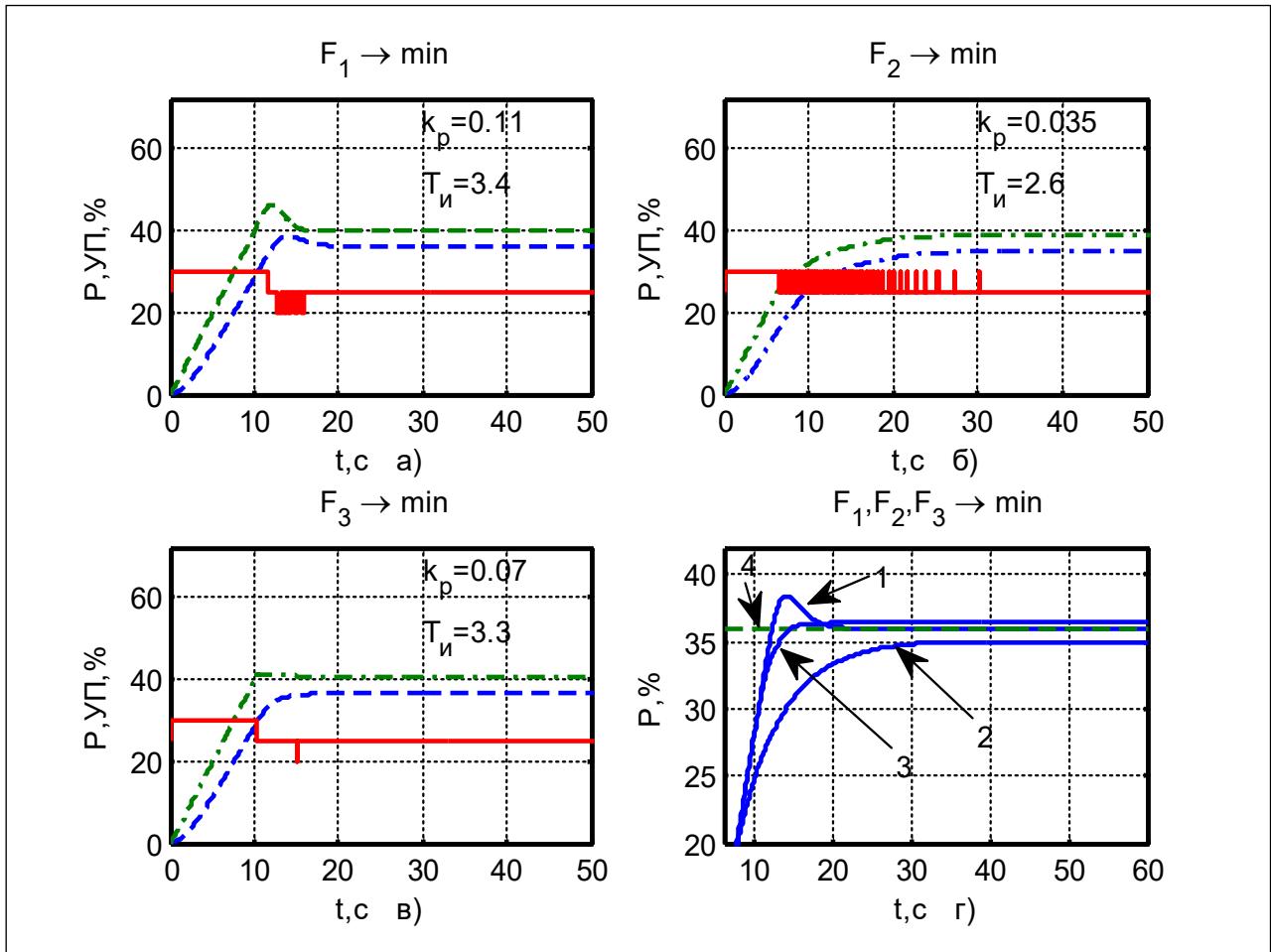


Рис. 3.3. Графики переходных процессов при оптимизации САР давления пара в деаэраторе

На графиках штриховая кривая соответствует регулируемому параметру – давлению, штрихпунктирная – положению РК, а непрерывная – импульсному выходу регулятора. Для наглядности на рис. 3.3, ε , сведены графики переходных процессов в увеличенном масштабе для регулируемых параметров всех трех случаев (кривая 1 – при $F_1 = \min$; 2 – при $F_2 = \min$; 3 – при $F_3 = \min$; 4 – заданное значение давления).

Как можно видеть, переходный процесс при минимальном значении критерия $F_1(X)$ характеризуется наличием перерегулирования (рис. 3.3, a), а переходный процесс при минимальном значении $F_2(X)$ не только затянут во времени (рис. 3.3, δ), но и имеет статическую ошибку (рис. 3.3, ε , кривая 2).

В то же время САР с параметрами, полученными при нахождении минимума критерия $F_3(X)$ среди множества Парето-решений для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$, имеет значительно лучшие динамические характеристики (рис. 3.3, в). Видно, что переходный процесс характеризуется не только отсутствием перерегулирования и быстродействием (рис. 3.3, г, кривая 3), но и малым количеством срабатываний регулятора (рис. 3.3, в).

Следует отметить, что высокое качество процесса регулирование, малое число срабатываний регулятора (один-два импульса) наблюдались во всех полученных реализациях. Значения параметров САР при оптимизации выбирались из принятых диапазонов $k_p \in [0,01; 1]$, $T_i \in [1; 30]$.

Рассчитанные при оптимизации параметры настройки регуляторов давления пара в деаэраторе, принятые в качестве исходных данных для анализа устойчивости контура регулирования, представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Параметры настройки регуляторов давления пара в деаэраторе

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Значение
1. Коэффициент передачи регулятора	k_p , с/%	0,07
2. Постоянная времени интегрирования	T_i , с	3,2
3. Постоянная времени демпфирования сигнала уровня	T_{fl} , с	2
4. Зона нечувствительности регулятора	Δ , %	1
5. Зона возврата регулятора	Δ_e , %	0,6

Результаты параметрического синтеза САР давления пара на уплотнения ЦНД, на уплотнения ЦВД, БРУ-СН (инерционные объекты) иллюстрируют рис. 3.4 и 3.5. Построение фронта Парето, выполненное при оптимизации, приведено на рис. 3.4. На критериальной плоскости с осями координат $F_1(X)$ и $F_2(X)$ показана аппроксимация фронта Парето (границы множества Парето) – множество точек не улучшаемых решений для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$, полученных при оптимизации САР с помощью ГА.

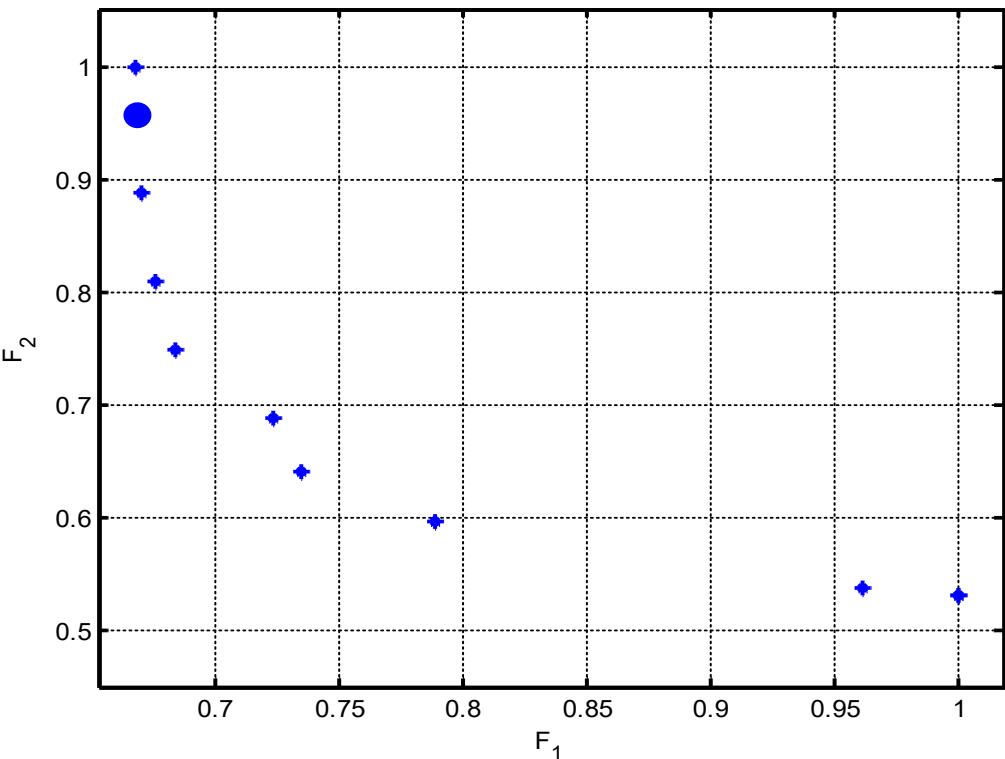


Рис. 3.4. Построение фронта Парето для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$ при оптимизации САР давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН

В результате привлечения дополнительного критерия $F_3(X)$ из множества точек Парето-оптимальных параметров САР для каждой реализации выбрано единственное решение (выделено кружком), соответствующее минимуму критерия $F_3(X)$.

Графики переходных характеристик САР давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН (возмущение заданным значением регулируемого параметра) при минимизации критериев $F_1(X) - F_3(X)$ показаны на рис. 3.5, *a–e*, соответственно. На графиках штриховая кривая соответствует регулируемому параметру – давлению, штрихпунктирная – положению РК, а непрерывная – импульсному выходу регулятора.

Для наглядности на рис. 3.5, *г*, сведены графики переходных процессов в увеличенном масштабе для регулируемых параметров всех трех случаев (кривая 1 – при $F_1 = \min$; 2 – при $F_2 = \min$; 3 – при $F_3 = \min$; штриховая прямая соответствует заданному значению давления).

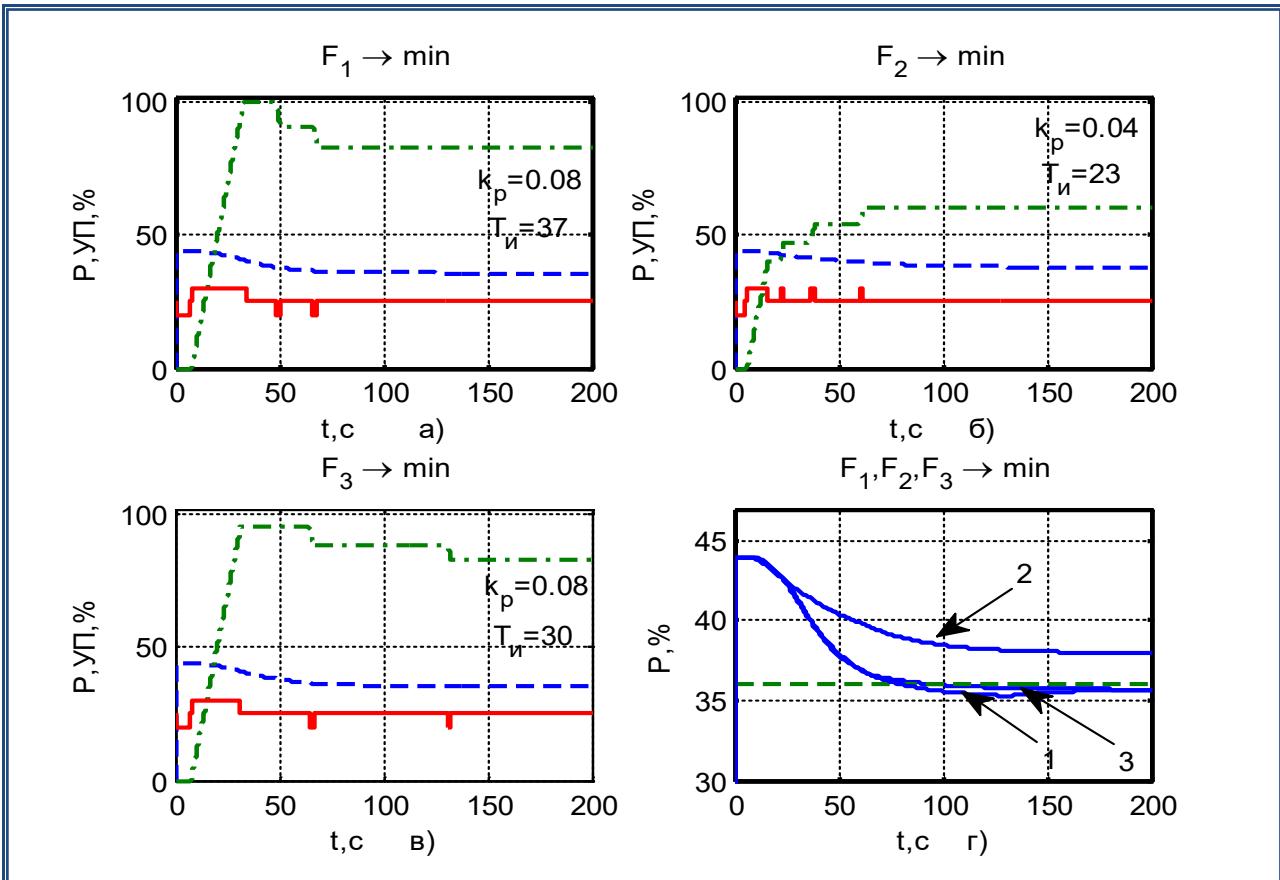


Рис. 3.5. Графики переходных процессов при оптимизации системы автоматического регулирования давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН

Как можно видеть, переходный процесс при минимальном значении критерия $F_1(X)$ характеризуется наличием незначительного перерегулирования (рис. 3.5, а), а переходный процесс при минимальном значении $F_2(X)$ не только затянут во времени (рис. 3.5, б), но и имеет статическую ошибку (рис. 3.5, г, кривая 2).

В то же время САР с параметрами, полученными при нахождении минимума критерия $F_3(X)$ среди множества Парето-решений для критериев $F_1(X)$ и $F_2(X)$, имеет значительно лучшие динамические характеристики (рис. 3.5, в). Видно, что переходный процесс характеризуется не только отсутствием перерегулирования и быстродействием (рис. 3.5, г, кривая 3), но и малым количеством срабатываний регулятора (рис. 3.5, в).

Вычисленные при оптимизации параметры настройки регуляторов давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН представлены в табл. 3.4.

**Параметры настройки регуляторов давления пара
на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН**

Наименование параметра	Обозначение, размерность	Значение
1. Коэффициент передачи регулятора	k_p , с/%	0,1
2. Постоянная времени интегрирования	T_i , с	30
3. Постоянная времени демпфирования сигнала уровня	T_{fl} , с	4,5
4. Зона нечувствительности регулятора	Δ , %	2
5. Зона возврата регулятора	Δ_e , %	0,6

Эти параметры настройки регуляторов давления пара приняты в качестве исходных данных для анализа устойчивости контуров регулирования.

3.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Задание. Определите оптимальные параметры настройки регулятора давления, используя многоцелевой генетический алгоритм.

Создайте в среде MATLAB / Simulink схему модели системы автоматического регулирования давления в соответствии с рис. 3.6. Значения скрытых параметров настройки указаны около блоков. Сохраните файл под именем a_reg_P23.slx.

При создании схемы (рис. 3.6) для вывода результатов расчета на графики предусмотрите сохранение параметров в рабочую область, используя окна настройки соответствующих блоков Scope:

- 1) для текущего значения давления – блок Scope (массив S1);
- 2) для заданного значения давления – блок Scope3 (массив S16);
- 3) для положения регулирующего клапана – блок Scope2 (массив S2);
- 4) для выхода регулятора – блок Scope1 (массив S3).

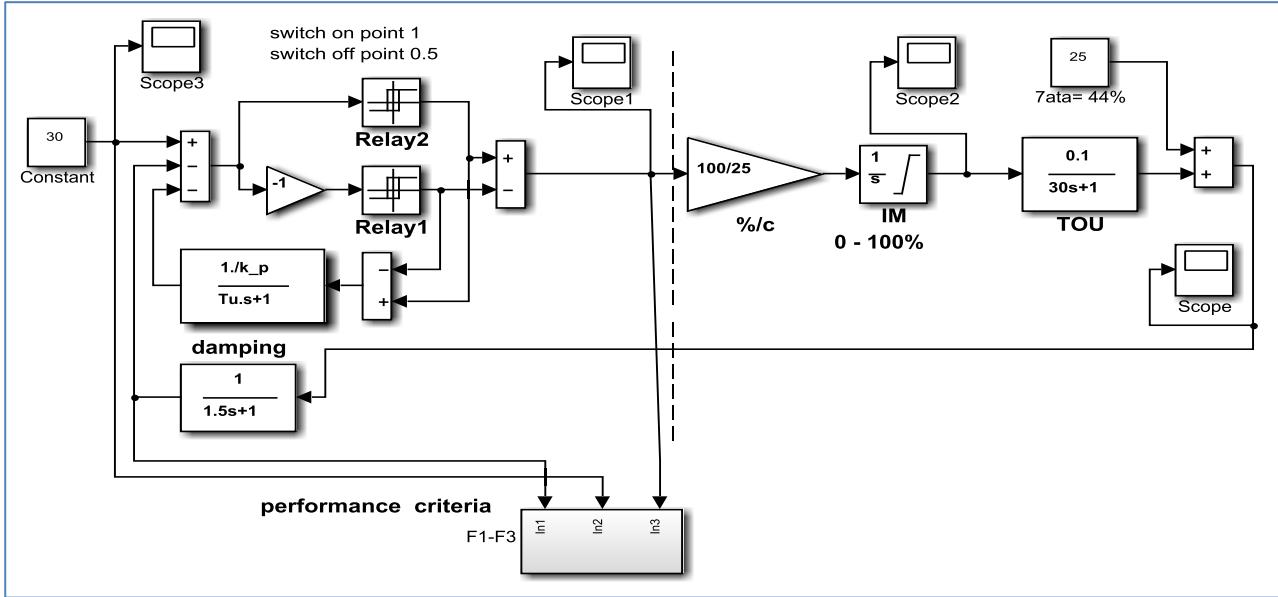


Рис. 3.6. Схема модели CAP давления (файл a_reg_P23.slx)

В окне настройки каждого блока, используя подменю **History**, надо выбрать пункт **Save data to workspace**, ввести имя соответствующего параметра и назначить формат **Array** (массив). В настройках интегрирующего блока **IM** необходимо задать ограничения (0 и 100 %).

Схему подсистемы **performance criteria** F_1 – F_3 (вычисления критериев качества работы CAP) реализовать так же, как и для системы регулирования уровня, т. е. в соответствии с рис 2.8. Подсистемы **criterion 1**–**3** для вычисления критериев F_1 , F_2 и F_3 (по выражениям (2.1)–(2.3)) реализовать в соответствии со схемами, приведенными на рис. 2.9–2.11.

Вычисленные значения критериев качества F_1 , F_2 и F_3 необходимо сохранять в рабочую область (см. блок **To Workspace** на рис. 2.8). Для каждого из параметров указать его имя (F_1 , F_2 или F_3), а также назначить формат **Array** (для сохранения в виде массива значений).

В подсистеме **criterion 3**, выполняющей расчет критерия F_3 (количество импульсов, формируемых регулятором), в настройках блоков **Hit Crossing** для формирования выходного параметра установите значение 0.5.

Назначьте время моделирования 200 с, переменный шаг счета и его максимальную величину 0.1 с, используя меню *Simulation / Model Configuration Parameters*.

Для расчета, оптимизации параметров, а также вывода результатов моделирования САР создайте файлы, тексты которых приведены на рис. 3.7–3.9. Перечень функций и их параметров, применяемых для исследования системы, приведен в приложении (табл. П.1, П.3, П.4).

Создайте скрипт-файл для выполнения многокритериальной оптимизации параметров и многократного вызова модели САР давления (в соответствии с рис. 3.7) и сохраните под именем *mulobj23_1.m*.

```
clc
clear all
rng shuffle %
global k_p Tu

open_system('a_reg_P23')
set_param('a_reg_P23/Transfer Fcn2', 'Numerator', '[1./k_p]')
set_param('a_reg_P23/Transfer Fcn2', 'Denominator', '[Tu 1]')
save_system('a_reg_P23')

lb = [0.1 1.5]; % X
ub = [5      50]; % X

options = gaoptimset('PopInitRange',[lb;ub], 'PopulationSize',30);
options = gaoptimset(options,'PlotFcns',{@gaplotpareto,@gaplotrankhist,...%
    @gaplotparetodistance,@gaplotscorediversity});
options = gaoptimset(options,'TolFun',1e-2,'StallGenLimit',5);
options.Display = 'iter'; %
options.Generations = 15; %
[x,fval,exitflag,output] = gamulti-
obj(@GoalFunland2,2,[],[],[],[],lb,ub,options)

fprintf('The number of points on the Pareto front was: %d\n',size(x,1));
fprintf('The average distance measure of the solutions on the
Pareto front was: %g\n', output.averagedistance);
fprintf('The spread measure of the Pareto front was: %g\n',
output.spread);
perpr p23%
```

*Рис. 3.7. Файл-сценарий для выполнения многокритериальной оптимизации параметров регулятора давления (скрипт *mulobj23_1.m*)*

Создайте файл-функцию (для расчета значений целевых функций оптимизационной задачи – критериев качества F_1 и F_2) в соответствии с рис. 3.8 и сохраните под именем GoalFun1and2.m.

```
function Y = GoalFun1and2(x)
    % J(k_p, Tu)
    %
    global k_p Tu
    k_p = x(1);
    Tu = x(2);
    %
    sim('a_reg_P23', 200)
    Z = F1(end);
    Z1 = F2(end);
    Y(1)=Z;
    Y(2)=Z1;
    %
end
```

Рис. 3.8. Файл для расчета целевых функций F_1 и F_2
(файл-функция GoalFun1and2.m)

Создайте скрипт-файл для расчета и визуализации переходных процессов, а также вычисления целевой функции F_3 (в соответствии с рис. 3.9) и сохраните под именем perpr_p23.m.

```
% переходные процессы F1=min, F2=min
open_system('a_reg_P23')
set_param('a_reg_P23/Transfer Fcn2', 'Numerator', '1./k_p')
set_param('a_reg_P23/Transfer Fcn2', 'Denominator', '[Tu 1]')
save_system('a_reg_P23')
%
[c,k] = min(fval,[],1);
k_p = x(k(1),1); Tu = x(k(1),2); sim('a_reg_P23', 250)

figure;
subplot(2,2,1);
```

Рис. 3.9. Файл-сценарий для расчета переходных характеристик САР давления
(скрипт perpr_p23.m) (начало)

```

hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2),S2(:,1),S2(:,2),'--',S3(:,1),5.*S3(:,2)+25);
set(hLines(1), 'LineWidth',2);set(hLines(2), 'LineWidth',2);
set(hLines(3), 'LineWidth',2)
    axis([0 100 0 101]); grid on
    title(' F_1 \rightarrow min ', 'FontSize',10)
    xlabel('t,c'), ylabel('P,УП,%'); set(gca,'LineWidth',2)
    text(52,62,['T_и=',num2str(Tu)]);
text(52,75,['k_p=',num2str(k_p)])

subplot(2,2,4);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2),S16(:,1),S16(:,2),'--');
set(hLines(1), 'LineWidth',2);
set(hLines(2), 'LineWidth',2);
axis([0 250 24 32]);
grid on
title(' F_1,F_2,F_3 \rightarrow min ', 'FontSize',10)
xlabel('t,c'), ylabel('P,%'); set(gca,'LineWidth',2);hold on
k_p = x(k(2),1); Tu = x(k(2),2); sim('a_reg_konf13o32',250)

subplot(2,2,2);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2),S2(:,1),S2(:,2),'--',S3(:,1),5.*S3(:,2)+25);
set(hLines(1), 'LineWidth',2);set(hLines(2), 'LineWidth',2);
set(hLines(3), 'LineWidth',2)
    axis([0 100 0 101]); grid on
    title('F_2 \rightarrow min ', 'FontSize',10)
    text(52,62,['T_и=',num2str(Tu)]);
text(52,75,['k_p=',num2str(k_p)])
    xlabel('t,c'), ylabel('P,УП,%'); set(gca,'LineWidth',2)
subplot(2,2,4);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2)); set(hLines(1), 'LineWidth',2);

%пoиск F3=min
open_system('a_reg_P23')
set_param('a_reg_P23/Transfer Fcn2', 'Numerator', '[1./k_p]')
set_param('a_reg_P23/Transfer Fcn2', 'Denominator', '[Tu 1]')
save_system('a_reg_P23')
%
m = length(x);
for i = 1:m,
    k_p = x(i,1);
    Tu = x(i,2);
    sim('a_reg_P23',250)
    Z22(i) = F3(end);
end

```

*Рис. 3.9. Файл-сценарий для расчета переходных характеристик САР давления
(скрипт perpr_p23.m) (продолжение)*

```

m1 =min(Z22)
[im] = find(Z22 == m1)
tu=x(im,2)
kp=x(im,1)
k_p = kp(1); Tu = tu(1); sim('a_reg_P23',250)
%
subplot(2,2,3);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2),S2(:,1),S2(:,2), '--'
',S3(:,1),5.*S3(:,2)+25);
set(hLines(1), 'LineWidth',2); set(hLines(2), 'LineWidth',2);
set(hLines(3), 'LineWidth',2)
axis([0 100 10 101]); xlabel('t,c'), ylabel('P, УП, %');
grid on
title(' F_3 \rightarrow min', 'FontSize',10)
text(52,62,['T_и=',num2str(Tu)]);
text(52,75,['k_p=',num2str(k_p)])
subplot(2,2,4);
hLines=plot(S1(:,1),S1(:,2)); set(hLines(1), 'LineWidth',2);

```

*Рис. 3.9. Файл-сценарий для расчета переходных характеристик САР давления
(скрипт perpr_p23.m) (окончание)*

Поместите все созданные файлы (mulobj23_1.m, GoalFun1and2.m, perpr_p23.m, a_reg_P23.slx) в одну директорию. Вызовите на выполнение файл-сценарий mulobj15_2.m, осуществляющий многократные вызовы Simulink-модели САР давления a_reg_P23.slx.

При выполнении процедуры оптимизации параметров САР в окне Genetic Algorithm наблюдайте результаты выполнения многоцелевого ГА (например, как на рис. 3.10), которые позволяют видеть построение фронта Парето (Pareto front) для целевых функций F_1 и F_2 в каждом поколении.

Кроме того, в окне выводятся количество особей, составляющих фронт Парето (Number of individuals) и динамика разброса, т. е. среднего расстояния между решениями во фронте Парето в популяциях поколений (Distance of individuals). Также в окне Genetic Algorithm можно видеть гистограммы разнообразия оценок для каждой из целевых функций F_1 и F_2 (Score Histogram).

При оптимизации в командном окне на каждой итерации ГА выводятся текущие характеристики фронта Парето для критериев F_1 и F_2 . (среднее расстояние между решениями и мера распространения фронта Парето).

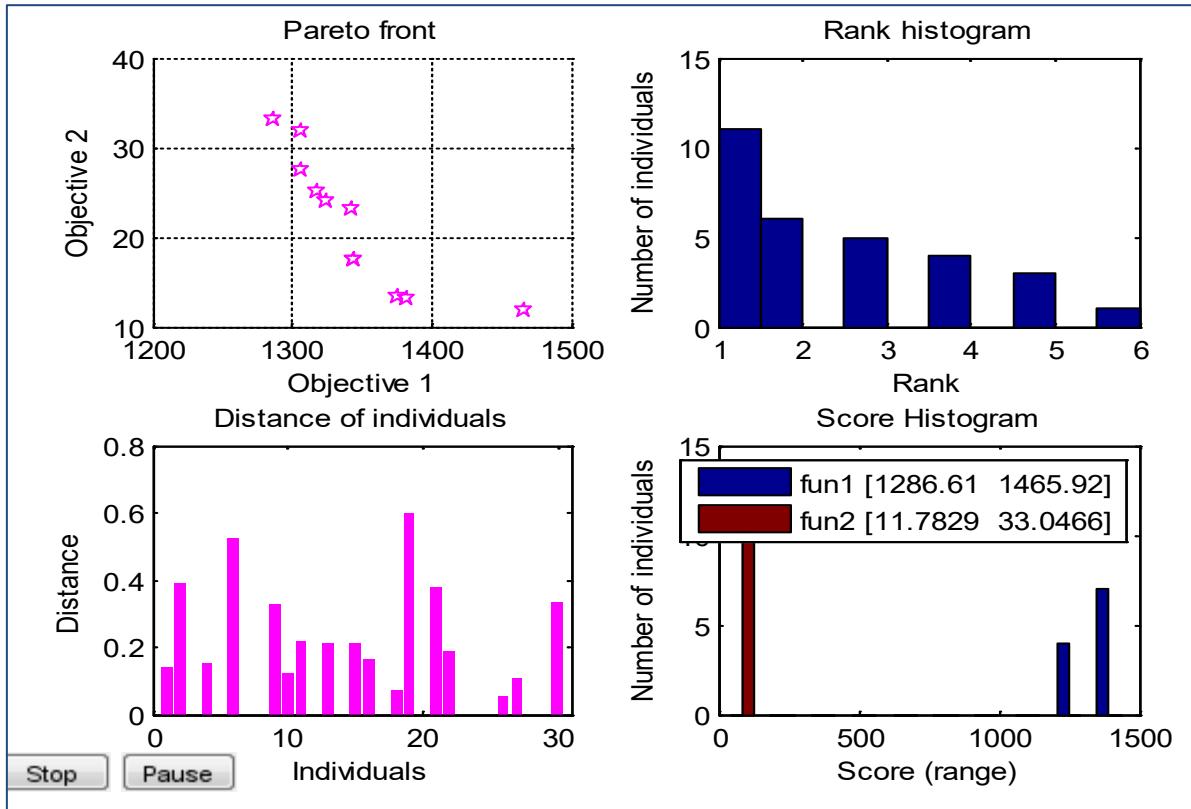


Рис. 3.10. Процесс оптимизации параметров регулятора давления с помощью многоцелевого генетического алгоритма

На рис. 3.11 представлены графики переходных процессов в САР давления с полученными оптимальными параметрами (для одной из реализаций).

Переходные процессы в системе с параметрами, соответствующими минимальному значению критерия F_1 , показаны на рис. 3.11, *a*, критерии F_2 и F_3 – на рис. 3.11, *б–в*, соответственно. Отметим, что минимум критерия F_3 ищется среди множества Парето-решений, найденных для целевых функций F_1 и F_2 .

Для наглядности графики изменения давления сведены в увеличенном масштабе на рис. 3.11, *г*: видно, что поддержание заданного значения давления производится во всех случаях с требуемой точностью.

Как можно видеть, для данной реализации переходный процесс при минимальном значении критерия F_1 сопровождается перерегулированием (рис. 3.11, *а*), а при минимальном значении F_2 (рис. 3.11, *б–г*) имеет статическую ошибку.

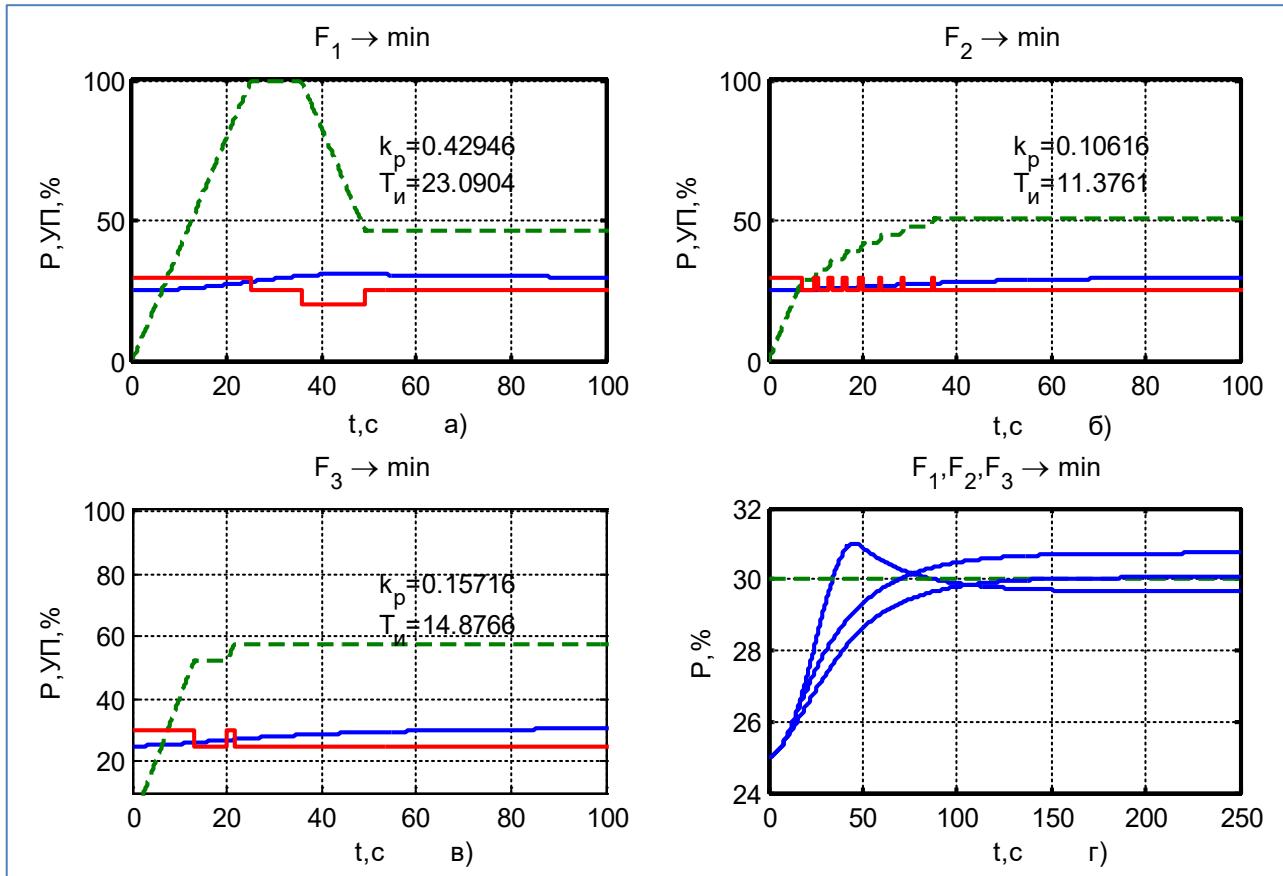


Рис. 3.11. Графики результатов расчета переходных характеристик САР давления при оптимизации

В этом случае рекомендуется выбрать параметры настройки, соответствующие минимальному значению критерия F_3 , который обеспечивает не только отсутствие перерегулирования и быстродействие, но и наименьшее число включений ИМ (рис. 3.11, в, г).

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику объекта управления.
2. В чем заключается назначение системы управления?
3. Опишите структуру и основные компоненты схемы модели САР давления.
4. Как ставится задача многокритериальной оптимизации? Какие показатели приняты для оценки качества работы САР? Что означает оптимальное по Парето (или эффективное) решение?

5. Как производится оптимизация САР давления с помощью многоцелевого генетического алгоритма? В чем сущность и преимущества ГА?
6. После выполнения расчетов поясните полученные результаты.

3.5. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ РЕГУЛЯТОРОВ ДАВЛЕНИЯ

На основе разработанной математической модели САР давления и оптимизации настроек выполняется анализ устойчивости регулятора. При этом надо решить следующие задачи:

- провести аппроксимацию используемого в САР релейно-импульсного регулятора давления линейным регулятором (для применения математического аппарата линейной теории анализа устойчивости);
- выполнить преобразования структурной схемы системы с аппроксимирующим линейным регулятором для получения эквивалентных передаточных функций по каналу задающего воздействия;
- вычислить полюса замкнутых систем и построить частотные годографы Найквиста;
- выполнить построение логарифмических частотных характеристик (диаграмм Боде) с определением запасов устойчивости;
- исследовать устойчивость аппроксимирующих линейных регуляторов с учетом дискретизации в контуре регулирования.

Для расчета использовать значения параметров системы, полученные при моделировании и оптимизации (см. табл. 3.3 и 3.4).

Рассмотрим выполнение аппроксимации релейно-импульсного регулятора линейным регулятором. При этом необходимо учитывать, что нелинейный алгоритм релейно-импульсного регулятора совместно с исполнительным механизмом (который является в динамическом отношении интегрирующим звеном) может быть аппроксимирован линейным ПИ-законом.

Напомним, что коэффициент передачи k_p линейного ПИ-регулятора и коэффициент передачи k_n эквивалентного ему исходного релейно-им-

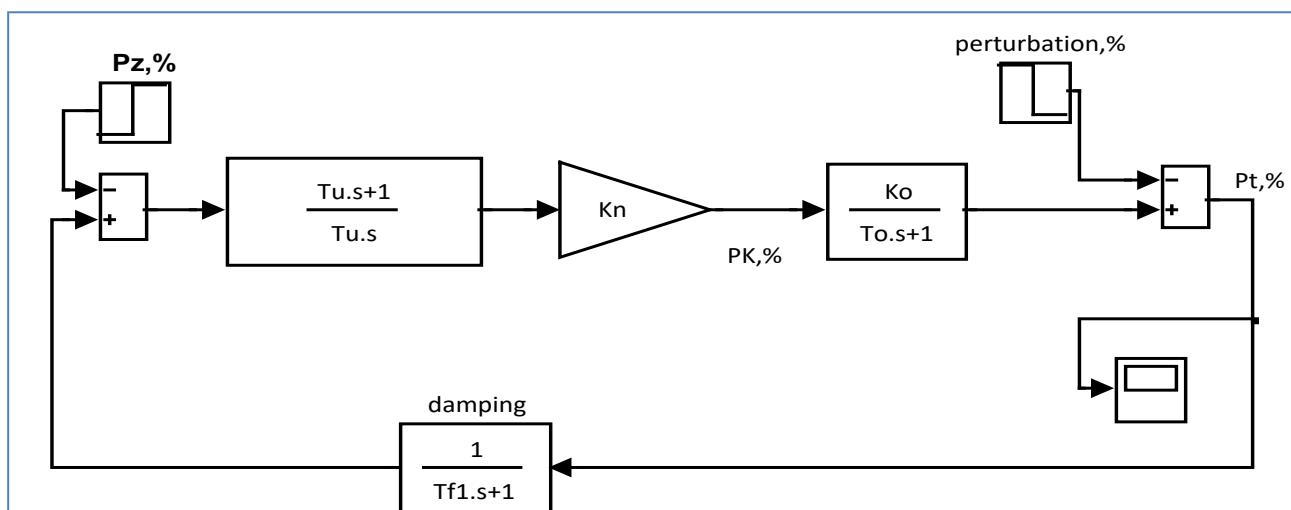
пульсного регулятора, реализующего ПИ-закон регулирования совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости, связаны зависимостью (2.5). То есть при принятых настройках релейно-импульсного регулятора давления пара в деаэраторе (см. табл. 3.3) коэффициент передачи линейного ПИ-регулятора

$$k_{\text{п}} = \frac{k_p T_u 100 \%}{T_{\text{им}}} = \frac{0,07 \cdot 3,2 \cdot 100}{25} = 0,9 \% \text{ откр}/\%.$$

В то время как для принятых настроек релейно-импульсных регуляторов давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН (см. табл. 3.4) коэффициент передачи линейного ПИ-регулятора регуляторов

$$k_{\text{п}} = \frac{k_p T_u 100 \%}{T_{\text{им}}} = \frac{0,1 \cdot 30 \cdot 100}{25} = 12 \% \text{ откр}/\%.$$

Для анализа устойчивости контура регулирования давления с линейным ПИ-регулятором использовалась схема модели (рис. 3.12), полученная из исходной схемы модели САР (см. рис. 3.1) с учетом линейной аппроксимации регулятора.



Rис. 3.12. Схема контура регулирования регулятора давления с эквивалентным линейным ПИ-регулятором

Для получения передаточной функции регулятора давления схема на рис. 3.12 представлена в виде, изображенном на рис. 3.13, а).

Передаточные функции, составляющие систему, следующие:

$$W_1(s) = \frac{k_n(T_n s + 1)}{T_n s}; \quad (3.1)$$

$$W_2(s) = \frac{k_w k_o}{(T_{fl} s + 1)(T_o s + 1)}. \quad (3.2)$$

На рис. 3.13, а, б, показана последовательность эквивалентных преобразований схемы регулятора давления к простейшему виду. Получена передаточная функция регулятора по каналу задающего воздействия

$$W_3(s) = \frac{W_1(s)W_2(s)}{1 + W_1(s)W_2(s)}. \quad (3.3)$$

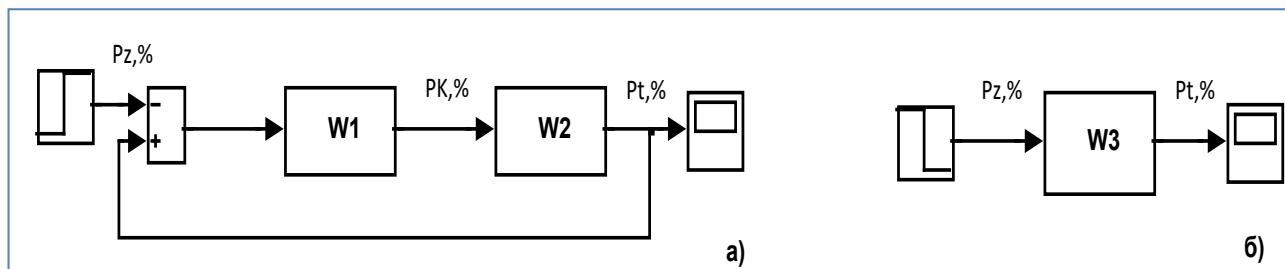


Рис. 3.13. Последовательность эквивалентных преобразований схемы регулятора давления к простейшему виду

После учета в полученном выражении (3.3) передаточных функций (3.1), (3.2) и подстановки принятых численных значений (см. табл. 3.3, 3.4) получены передаточные функции замкнутой системы для регуляторов давления (табл. 3.5, 3.6).

Передаточная функция замкнутой системы для регулятора давления пара в деаэраторе, а также вычисленные полюса передаточной функции приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

**Передаточная функция замкнутой системы для регулятора давления пара
в деаэраторе, полюса передаточной функции**

Параметры	Передаточная функция регулятора давления	Полюса передаточной функции
$k_{\text{п}} = 0,9 \%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 3,2 \text{ с}; T_{\text{f}} = 2 \text{ с}$	$W_5(s) = \frac{0,576s^2 + 0,468s + 0,09}{12,8s^3 + 12,8s^2 + 3,5s + 0,09}$	-0.49 + 0.09i -0.49 - 0.09i -0.029
$k_{\text{п}} = 9 \%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 3,2 \text{ с}; T_{\text{f}} = 2 \text{ с}$	$W_5(s) = \frac{5,76s^2 + 4,68s + 0,9}{12,8s^3 + 12,8s^2 + 6,1s + 0,9}$	-0.38 + 0.38i -0.38 - 0.38i -0.24

Для сравнения в этой же таблице кроме расчетов при рекомендуемых параметрах регулятора, полученных при оптимизации ($k_{\text{п}} = 0,9 \%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 3 \text{ с}$), приведены результаты при 10-кратном увеличении коэффициента передачи регулятора ($k_{\text{п}} = 9 \%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 3 \text{ с}$).

В обоих рассмотренных случаях корни характеристического полинома (полюса) находятся в левой полуплоскости комплексной плоскости, что свидетельствует об устойчивости системы регулирования.

Передаточная функция замкнутой системы для регулятора давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН, а также вычисленные полюса передаточной функции приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

**Передаточная функция замкнутой системы для регулятора давления пара
на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН, полюса передаточной функции**

Параметры	Передаточная функция регулятора давления	Полюса передаточной функции
$k_{\text{п}} = 12 \%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 30 \text{ с}; T_{\text{f}} = 4,5 \text{ с}$	$W_5(s) = \frac{162s^2 + 41,4s + 1,2}{4050s^3 + 1035s^2 + 66s + 1,2}$	- 0.17 - 0.052 - 0.033
$k_{\text{п}} = 60 \%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 30 \text{ с}; T_{\text{f}} = 4,5 \text{ с}$	$W_5(s) = \frac{810s^2 + 207s + 6}{4050s^3 + 1035s^2 + 210s + 6}$	-0.11 + 0.18i -0.11 - 0.18i -0.033

Для сравнения в этой же таблице кроме расчетов при рекомендуемых параметрах регулятора, полученных при оптимизации ($k_{\pi} = 12\%$ откр /%; $T_i = 30$ с, приведены результаты при 5-кратном увеличении коэффициента передачи регулятора ($k_{\pi} = 60\%$ откр /%; $T_i = 30$ с).

В обоих рассмотренных случаях корни характеристического полинома (полюса) находятся в левой полуплоскости комплексной плоскости, что свидетельствует об устойчивости системы регулирования.

Анализ влияния дискретизации сигналов на устойчивость контура регулирования производился с помощью преобразования передаточной функции непрерывной системы регулирования в дискретную систему.

При этом учитывалось, что период дискретизации t_0 при работе цифрового контроллера, реализующего алгоритм работы регулятора, в среднем равен 0,2 с.

Дискретная передаточная функция замкнутой системы для регуляторов давления по каналу задающего воздействия, а также вычисленные полюса дискретной системы для рассматриваемых вариантов параметров регулятора приведены в табл. 3.7, 3.8.

Таблица 3.7

**Дискретная передаточная функция замкнутой системы
для регулятора давления пара в деаэраторе,
полюса передаточной функции**

Параметры	Дискретная передаточная функция регулятора давления	Полюса передаточной функции
$k_{\pi} = 0,9\%$ откр /%; $T_i = 3,2$ с; $T_f = 2$ с	$W_5(z) = \frac{0,0004z^2 + 0,00006z + 0,0004}{z^3 - 2,8z^2 + 2,6z - 0,82}$	$0,91 + 0,017i$ $0,91 - 0,017i$ $0,994$
$k_{\pi} = 9\%$ откр /%; $T_i = 3,2$ с; $T_f = 2$ с	$W_5(z) = \frac{0,09z^2 + 0,16z + 0,075}{z^3 - 2,8z^2 + 2,6z - 0,82}$	$0,92 + 0,017i$ $0,92 - 0,017i$ $0,953$

Таблица 3.8

**Дискретная передаточная функция замкнутой системы
для регулятора давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН,
полюса передаточной функции**

Параметры	Дискретная передаточная функция регулятора давления	Полюса передаточной функции
$k_{\Pi} = 12\%$ откр /%; $T_i = 30$ с; $T_f = 4,5$ с	$W_5(z) = \frac{0,008z^2 + 0,016z + 0,0076}{z^3 - 2,95z^2 - 2,9z - 0,95}$	0.993 0.991 0.94
$k_{\Pi} = 60\%$ откр /%; $T_i = 30$ с; $T_f = 4,5$ с	$W_5(z) = \frac{0,04z^2 + 0,78z + 0,038}{z^3 - 2,94z^2 + 2,89z - 0,95}$	0.98 + 0.035i 0.98 - 0.035i 0.99

Полюса замкнутой дискретной системы остаются внутри единичной окружности для обоих вариантов каждого типа регуляторов, что свидетельствует об устойчивости системы регулирования.

3.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Задание 1. Выполните анализ устойчивости регулятора давления пара в деаэраторе. Создайте скрипт-файл в среде MATLAB в соответствии с рис. 3.14 и сохраните под именем UST_P_dr_23.m. Перечень функций, применяемых для исследования системы, приведен в приложении (табл. П.2, П.3).

```
%Анализ устойчивости САР давления пара в деаэраторе
clc
clear all
%формирование tf-модели в виде передаточной функции
sys=tf([3.2*0.9 0.9], [ 3.2 0]) % модель ПИ-регулятора (ПД+ШБ)
sys1=tf([0.1], [2 1]) % модель объекта
```

*Рис. 3.14. Сценарий для исследования устойчивости регулятора давления пара
в деаэраторе (файл-скрипт UST_P_dr_23.m) (начало)*

```

sys2=series(sys,sys1)%последовательное соединение с моделью
объекта
%демпфер Т=2с
sys3=tf([1],[2 1]);%демпфер Т=2с
sys5=feedback(sys2,[sys3])%обратная связь
sys6=series(sys2,sys3)%разомкнутая система
sys5=feedback(sys6,[1])%обратная связь
    pole(sys5)%вычисление полюсов замкнутой системы
sys4=tf([1],[2 1]);%демпфер Т=2с
sys=tf([3.2*9 9],[ 3.2 0]);% модель ПИ-регулятора (ПД+ШБ)
sys2=series(sys,sys1);%последовательное соединение с моделью
объекта
sys7=feedback(sys2,[sys4])%обратная связь
sys8=series(sys2,sys4);%разомкнутая система
    pole(sys7)%вычисление полюсов замкнутой системы
% цифровая система
T=0.2;
[sys5d]=c2d(sys5,T,'zoh')
[sys6d]=c2d(sys6,T,'zoh')
[sys7d]=c2d(sys7,T,'zoh')
[sys8d]=c2d(sys8,T,'zoh')

figure
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(sys6);
nyquist(sys6,sys8,sys6d,'--',sys8d,'--'),grid%годограф
Найквиста
set(gca,'LineWidth',2)
axis([-1.1 0.05 -3. 3.])

figure
subplot(2,1,1),bode(sys6d,'--
',sys6,{0.01,100}),grid;%диаграммы Боде

[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(sys6);[Gm1,Pm1,Wcg,Wcp]=margin(sys6d);
title(['Gm=',num2str(Gm),'; Pm=',num2str(Pm),' '
Gm1=',num2str(Gm1),'; Pm1=',num2str(Pm1),' а) ']);

subplot(2,1,2),bode(sys8,'-',sys8d,'--'),grid;
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(sys8);[Gm1,Pm1,Wcg,Wcp]=margin(sys8d);
title(['Gm=',num2str(Gm),'; Pm=',num2str(Pm),' '
Gm1=',num2str(Gm1),'; Pm1=',num2str(Pm1),' б) ']);

pole(sys5d)
pole(sys7d)

```

Рис. 3.14. Сценарий для исследования устойчивости регулятора давления пара в деаэраторе (файл-скрипт UST_P_dr_23.m) (окончание)

Запустите на выполнение скрипт `UST_P_dr_23.m` и выполните построение частотных характеристик системы регулирования давления пара в деаэраторе для подтверждения полученных результатов (см. табл. 3.5 и 3.7) при исследовании устойчивости системы на основе определения полюсов передаточных функций.

При построении диаграмм Найквиста для регулятора давления пара в деаэраторе, приведенных на рис. 3.15, использованы выбранные оптимальные параметры регулятора ($(k_{\text{п}} = 0,9 \% \text{ откр} / \%)$; $T_{\text{i}} = 3 \text{ с}$; $T_{\text{f}} = 3 \text{ с}$) и параметры при 10-кратном увеличении коэффициента передачи регулятора ($k_{\text{п}} = 9 \% \text{ откр} / \%$).

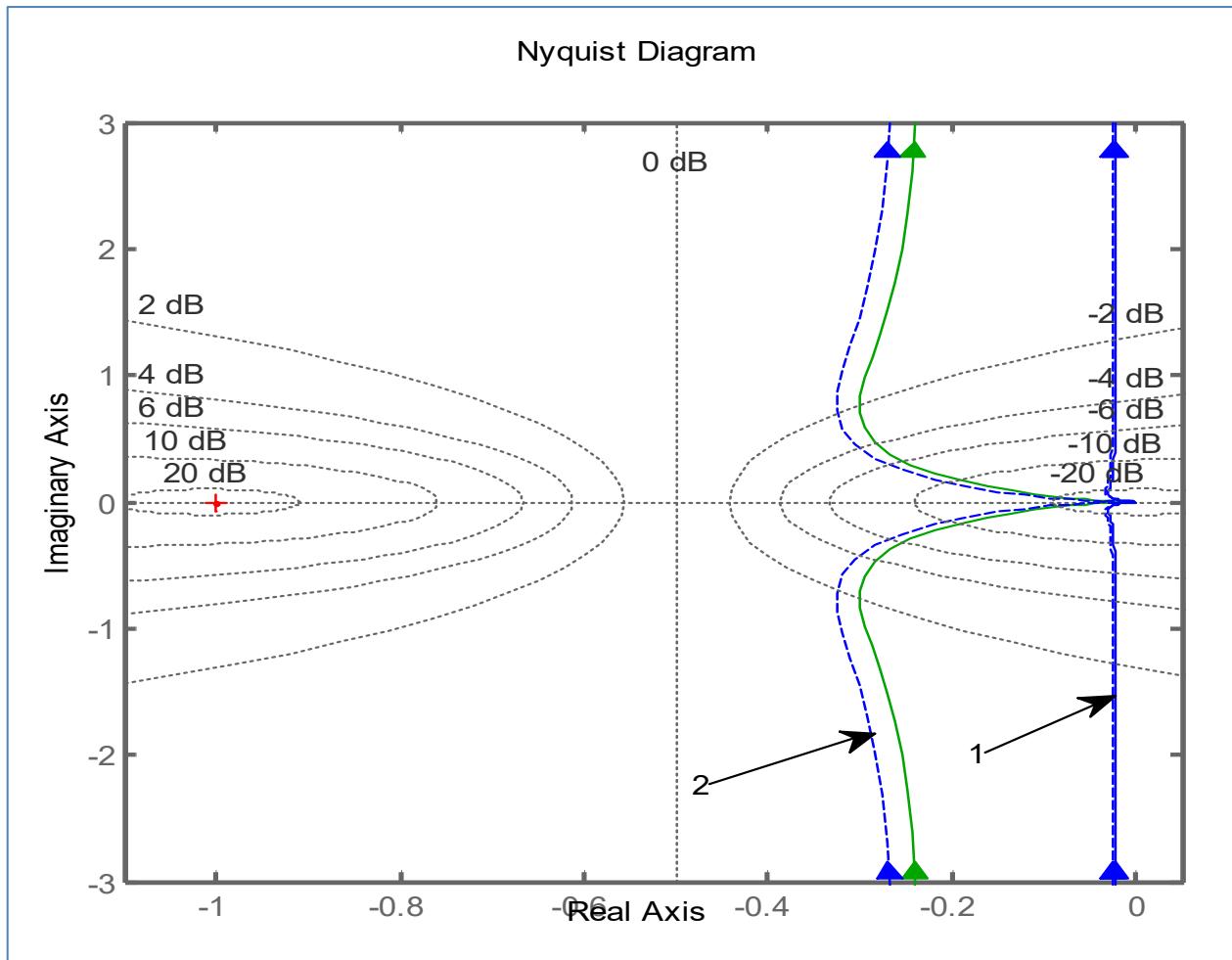


Рис. 3.15. Частотные годографы Найквиста непрерывной (сплошная линия) и дискретной (штриховая линия) системы с регулятором давления пара в деаэраторе:
 $1 - k_{\text{п}} = 0,9 \% \text{ откр} / \%; T_{\text{i}} = 3,2 \text{ с}; T_{\text{f}} = 2 \text{ с}; 2 - k_{\text{п}} = 9 \% \text{ откр} / \%; T_{\text{i}} = 3,2 \text{ с}; T_{\text{f}} = 2 \text{ с}$

Поясните построенные с помощью скрипта UST_P_dr_23.m частотные годографы Найквиста, которые реализованы для непрерывной (сплошная линия) и дискретной (штриховая линия) разомкнутых систем регулирования.

Изучите полученные диаграммы и убедитесь, что даже при таком значительном увеличении коэффициента передачи регулятора относительно рекомендуемого значения система остается устойчивой – годограф Найквиста не охватывает критическую точку $(-1, j0)$ на комплексной плоскости.

Поясните построенные с помощью скрипта UST_P_dr_23.m логарифмические частотные характеристики (диаграммы Боде) разомкнутой системы регулирования уровня, приведенные на рис. 3.16.

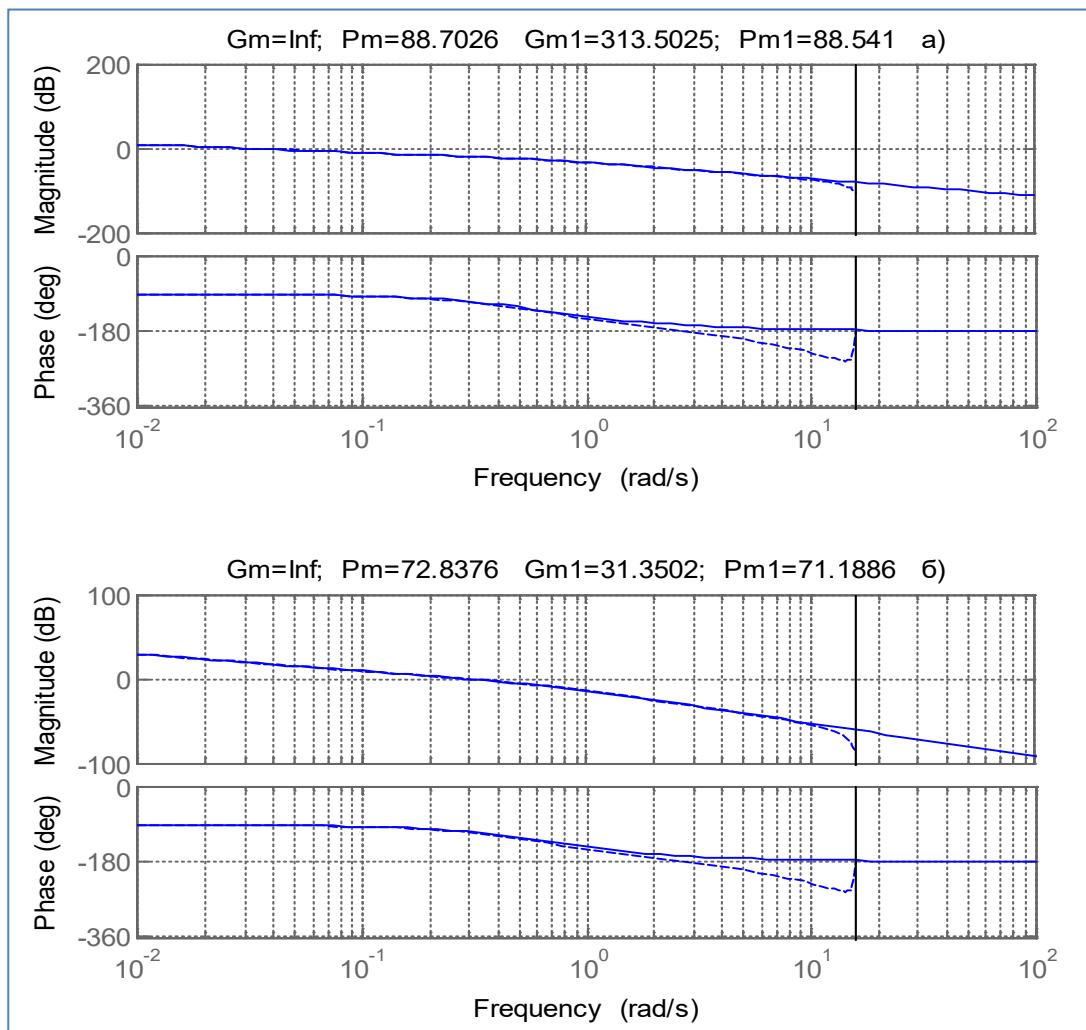


Рис. 3.16. Определение запасов устойчивости для непрерывной (сплошная линия) и дискретной (штриховая линия) системы регулирования давления пара в деаэраторе:
 а – $k_n = 0,9\%$ откр /%; $T_u = 3,2$ с; $T_f = 2$ с; б – $k_n = 9\%$ откр /%; $T_u = 3,2$ с; $T_f = 2$ с

Поясните, каким образом на основе диаграмм Боде определены запасы устойчивости по модулю и по фазе.

Напомним, что диаграммы Боде ставят в соответствие критической точке $(-1, j0)$ диаграммы Найквиста значения 0 дБ для модуля амплитудно-частотной характеристики и минус 180° для фазового сдвига фазочастотной характеристики.

Для анализа относительной устойчивости системы производится расчет запасов устойчивости системы по амплитуде G_m и по фазе P_m .

Следует иметь в виду, что система с недостаточным запасом устойчивости по фазе имеет значительно выраженные колебательные переходные процессы, что является нежелательным с точки зрения обеспечения ее технологической работоспособности.

Показано (см. рис. 3.16) определение запасов устойчивости для системы с рекомендуемыми параметрами для регулятора давления пара в деаэраторе ($k_n = 0,9\%$ открытие /%; $T_i = 3$ с; $T_f = 3$ с) и при 10-кратном увеличении коэффициента передачи регулятора ($k_n = 9\%$ открытие /%).

Для регулятора давления пара в деаэраторе на частоте, при которой модуль амплитудно-частотной характеристики имеет значение 0 дБ, по имеющемуся фазовому сдвигу определен запас устойчивости системы по фазе P_m . Он составил: $P_m = 88,7^\circ$ для рекомендованной величины коэффициента передачи регулятора ($k_n = 0,9\%$ открытие /%); $P_m = 72,8^\circ$ при 10-кратном увеличении коэффициента передачи регулятора ($k_n = 9\%$ открытие /%).

В случае 10-кратного увеличения коэффициента передачи регулятора k_n для дискретной системы запасы устойчивости системы по амплитуде и фазе уменьшились ($G_{m1} = 31,35$; $P_{m1} = 71,18^\circ$), оставаясь в принятом на практике диапазоне.

Задание 2. Выполните анализ устойчивости регулятора давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН. Создайте скрипт-файл в среде MATLAB в соответствии с рис. 3.17 и сохраните под именем UST_P_15_23.m.

```

%Анализ устойчивости системы регулирования давления пара
%на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН
clc
clear all

%формирование tf-модели в виде передаточной функции
sys=tf([30*12 12],[ 30 0]);% модель ПИ-регулятора (ПД+ШБ)
sys1=tf([0.1],[30 1]);% модель объекта
sys2=series(sys,sys1);%последовательное соединение с моделью
%объекта

%демпфер T=4.5с
sys3=tf([1],[4.5 1]);%демпфер T=4,5с
sys5=feedback(sys2,[sys3])%обратная связь
sys6=series(sys2,sys3);%разомкнутая система
    pole(sys5)%вычисление полюсов замкнутой системы
sys4=tf([1],[4.5 1]);%демпфер T=4,5с
sys=tf([30*60 60],[ 30 0]);% модель ПИ-регулятора (ПД+ШБ) Ti=30с; Kr=60
sys2=series(sys,sys1);%последовательное соединение с моделью объекта
sys7=feedback(sys2,[sys4])%обратная связь
sys8=series(sys2,sys4);%разомкнутая система
    pole(sys7)%вычисление полюсов замкнутой системы
%
% цифровая система
T=0.2;
[sys5d]=c2d(sys5,T,'zoh')
[sys6d]=c2d(sys6,T,'zoh')
[sys7d]=c2d(sys7,T,'zoh')
[sys8d]=c2d(sys8,T,'zoh')
    pole(sys7d)%вычисление полюсов замкнутой системы
    figure
nyquist(sys6,sys8,sys6d,'--',sys8d,'--'),grid%годограф Найквиста
set(gca,'LineWidth',2)
axis([-1.1 0.05 -3. 3. ])
figure
subplot(2,1,1),bode(sys6d,'--',sys6,{0.01,100}),
grid;%диаграммы Боде

[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(sys6); [Gm1,Pm1,Wcg,Wcp]=margin(sys6d);
title(['Gm=',num2str(Gm),'; Pm=',num2str(Pm),'
Gm1=',num2str(Gm1),'; Pm1=',num2str(Pm1), ' а']);
subplot(2,1,2),bode(sys8,'-',sys8d,'--'),grid;
[Gm,Pm,Wcg,Wcp]=margin(sys8); [Gm1,Pm1,Wcg,Wcp]=margin(sys8d);
title(['Gm=',num2str(Gm),'; Pm=',num2str(Pm),
Gm1=',num2str(Gm1),'; Pm1=',num2str(Pm1), ' б']);

```

Рис. 3.17. Сценарий для исследования устойчивости регулятора давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН (файл-скрипт UST_P_15_23.m)

Запустите на выполнение скрипт **UST_P_15_23.m** и выполните построение частотных характеристик системы регулирования давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН для подтверждения полученных результатов (см. табл. 3.6 и 3.8) при исследовании устойчивости системы на основе определения полюсов передаточных функций.

На рис. 3.18 приведены диаграммы Найквиста при выбранных оптимальных параметрах регулятора давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН ($k_{\text{п}} = 12\%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 30$ с) и при 5-кратном увеличении коэффициента передачи регулятора ($k_{\text{п}} = 60\%$ откр /%; $T_{\text{и}} = 30$ с).

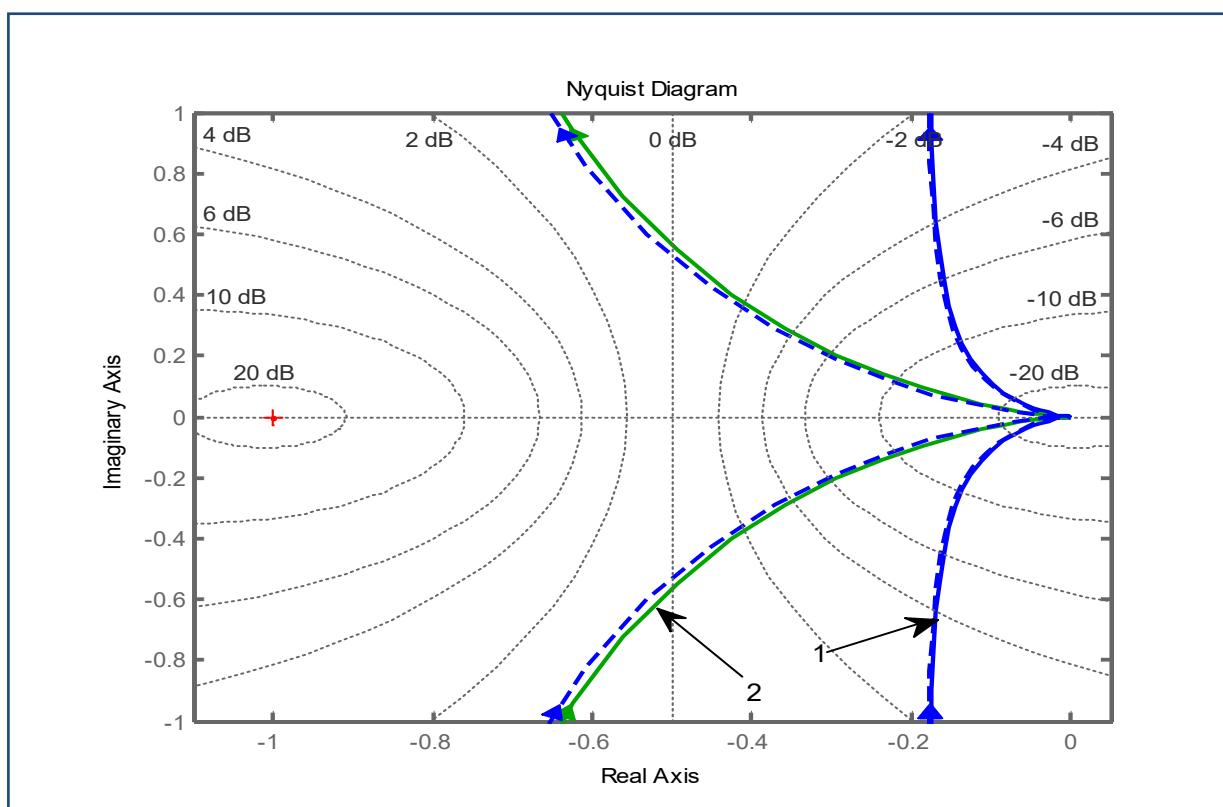


Рис. 3.18. Частотные годографы Найквиста непрерывной (сплошная линия) и дискретной (штриховая линия) системы с регулятором давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН:

$$1 - k_{\text{п}} = 12\% \text{ откр /%; } T_{\text{и}} = 30 \text{ с; } T_f = 4,5 \text{ с; } 2 - k_{\text{п}} = 60\% \text{ откр /%; } T_{\text{и}} = 30 \text{ с; } T_f = 4,5 \text{ с}$$

Частотные годографы Найквиста построены для непрерывных (сплошная линия) и дискретных (штриховая линия) разомкнутых систем регулирования. Как можно видеть из диаграмм, даже при таком увеличении ко-

эффективности передачи регулятора относительно рекомендуемого значения система остается устойчивой – годограф Найквиста не охватывает критическую точку $(-1, j0)$ на комплексной плоскости.

На рис. 3.19 приведены построенные в среде MATLAB логарифмические частотные характеристики (диаграммы Боде) разомкнутой системы, по которым определены запасы устойчивости по модулю и по фазе.

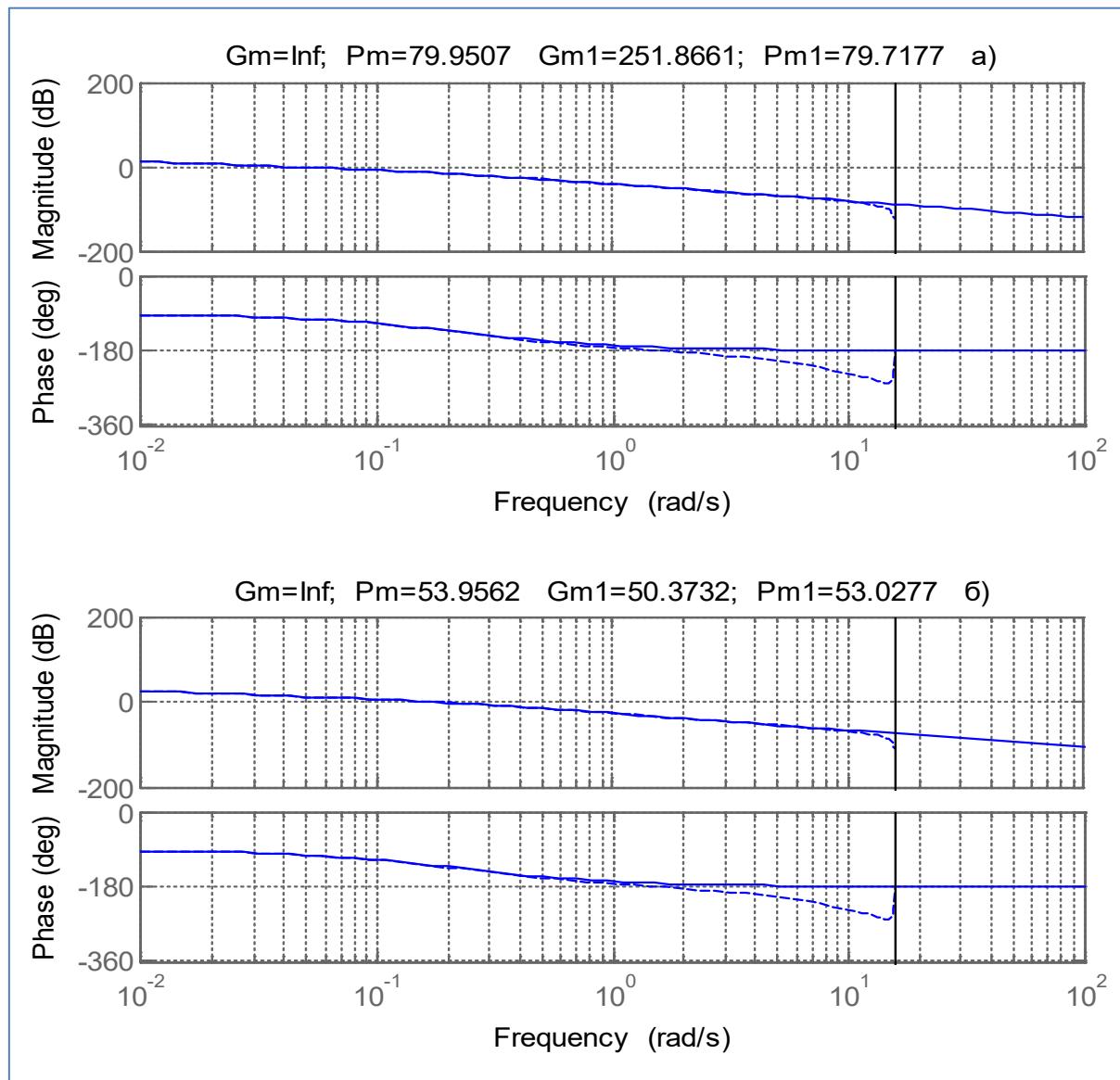


Рис. 3.19. Определение запасов устойчивости регулятора давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН для непрерывной (сплошная линия) и дискретной (штриховая линия) системы регулирования при:

a – $k_{\pi} = 12\%$ откр /%; $T_i = 30$ с; $T_f = 4,5$ с; *б* – $k_{\pi} = 60\%$ откр /%; $T_i = 30$ с; $T_f = 4,5$ с

Поясните, какие значения модуля (амплитудно-частотной характеристики) и фазового сдвига (фазочастотной характеристики) диаграммы Боде ставят в соответствие критической точке $(-1, j0)$ диаграммы Найквиста.

Для анализа относительной устойчивости системы произведен расчет запасов устойчивости системы по амплитуде G_m и по фазе P_m . Поясните (см. рис. 3.19), как производится определение запасов устойчивости для системы с рекомендуемыми параметрами для регулятора давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН ($k_n = 12\%$ открытие /%; $T_i = 30$ с; $T_f = 4,5$ с) и при 5-кратном увеличении коэффициента передачи регулятора ($k_n = 60\%$ открытие /%; $T_i = 30$ с).

Как можно видеть, во всех рассмотренных случаях для непрерывной системы (непрерывная линия) фазочастотная характеристика, асимптотически приближаясь к значению минус 180° , не достигает его, поэтому запас устойчивости системы по амплитуде G_m не ограничен ($G_m = \infty$).

Для регулятора давления пара на уплотнения ЦНД (ЦВД), БРУ-СН на частоте, при которой модуль амплитудно-частотной характеристики имеет значение 0 дБ, по имеющемуся фазовому сдвигу определен запас устойчивости системы по фазе P_m . Он составил: $P_m = 79,95^\circ$ для рекомендованной величины коэффициента передачи регулятора ($k_n = 12\%$ открытие /%) и $P_m = 53,95^\circ$ при 5-кратном увеличении коэффициента передачи регулятора ($k_n = 60\%$ открытие /%).

В случае 5-кратного увеличения коэффициента передачи регулятора k_n для дискретной системы запасы устойчивости системы по амплитуде и фазе уменьшились ($G_{m1} = 50,37$; $P_{m1} = 63,02^\circ$), оставаясь в принятом на практике диапазоне.

Напомним, что в реальных системах из-за наличия нелинейностей при значительном уменьшении коэффициента обратной связи относительно рекомендуемого значения возможно возникновение автоколебательных режимов. Поэтому в качестве исходных значений настроек параметров для рассмотренных регуляторов давления следует принять рекомендованные величины (см. табл. 3.3 и 3.4).

Контрольные вопросы

1. Какие функции исследования САР давления реализованы скрипты файлами `UST_P_dr_23.m` и `UST_P_15_23.m`?
2. По каким правилам выполняются преобразования структурных схем линейных САР? Как подтвердить эквивалентность преобразованной и исходной схем системы?
3. Поясните построенные с помощью MATLAB логарифмические частотные характеристики АЧХ и ФЧХ. Как по ним оцениваются запасы устойчивости САР давления по модулю и по фазе?
4. Поясните построение частотных голографов Найквиста.
5. Чем отличаются построенные частотные характеристики для рассмотренных регуляторов давления пара? В чем причины отличий?

4. ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ ПЕЧИ НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ УСТАНОВКИ

4.1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Рассмотрим вопросы управления технологическим объектом нефтеперерабатывающего завода с помощью многосвязной системы автоматического регулирования (МСР) на примере многопоточной печи [23]. Созданная МСР должна осуществлять автоматическую стабилизацию выходных параметров объекта, тем самым обеспечивая снижение количества параметров объекта, требующих постоянного контроля со стороны оператора установки.

Отметим, что до разработки МСР автоматическое управление печью в системе управления осуществлялось по одному основному параметру – температуре на выходе из печи. При этом вручную производилось задание температуры суммарного потока, связанного с регулятором, который управляет давлением топливного газа на форсунки печи.

Управление потоками печи также осуществлялось вручную оператором путем установления заданного значения (уставки) для каждого из потоков печи. При этом получение тепловой энергии каждым из змеевиков печи велось неравномерно и зависело от внутренней конструкции печи, а количество змеевиков печей данного типа может варьироваться от 2 до 6.

Необходимость создания многосвязной системы регулирования была обусловлена тем, что к оператору установки системы управления технологическим процессом многопоточной печи предъявлялись высокие требования. Это и необходимость постоянного внимания к выполняемому технологическому процессу, и совершение множества действий при контроле и управлении загрузкой печи и потоками печи. При этом в связи с нерегулярным ручным выравниванием температур потоков, осуществляемым

оператором установки в процессе работы, наблюдалось, как следствие, снижение КПД печи.

Многосвязная система автоматического регулирования, предназначенная для управления многопоточной печью с помощью специализированных алгоритмов, позволяет снизить количество управляющих параметров (формируемых вручную оператором установки), обеспечить автоматическую стабилизацию выходных параметров, что, в свою очередь, позволит повысить КПД печи.

Разработанная МСР реализует функцию супервизорного управления, т. е. позволяет непрерывно контролировать выходные параметры многопоточной печи и формировать на их основе уставки локальным регуляторам потоков печи, обеспечивая оптимизацию технологических процессов.

Непрерывное автоматическое поддержание минимальной разности между температурами потоков печи (вместо нерегулярного выравнивания температур потоков оператором) обеспечивает существенное улучшение качества управления.

4.2. ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Отметим, что многопоточные печи установок нефтеперерабатывающих производств имеют относительно большое число управляемых величин и управляющих воздействий, т. е. являются многомерными объектами управления. Как известно, регулирование многомерных объектов может быть несвязанным и связанным [12, 15, 24–26].

В первом случае (при несвязанном регулировании) каждая регулируемая величина регулируется одним регулятором, воздействующим на регулирующий орган. Во втором случае (при связанном регулировании) каждый регулятор воздействует и на другие регулируемые величины.

Выбор способа регулирования определяется характером связей между регулируемыми величинами, которые существуют внутри управляемого

объекта. Такие взаимосвязи обусловлены наличием общих для нескольких регулируемых величин возмущений или общих регулирующих воздействий.

В случае если на регулируемую величину одного канала регулирования действует добавочное возмущение от входных переменных другого канала, ухудшающее качество функционирования первого канала, целесообразно осуществить компенсацию этого возмущения введением дополнительных связей между соответствующими регуляторами.

При разработке систем управления многомерными объектами необходимо руководствоваться принципом автономности – одним из фундаментальных принципов проектирования многосвязных систем управления [12]. Сущность этого принципа состоит в установлении между отдельными регуляторами многомерного объекта специально подобранных связей так, чтобы были скомпенсированы внутренние связи в объекте между регулируемыми величинами. В результате многомерная система регулирования может рассматриваться как соответствующее число независимых (автономных) одномерных систем.

Проанализируем необходимость построения системы с компенсацией возмущений для регулирования многопоточной печи. Регулирование печи как многомерного объекта является связанным, то есть каждый регулятор, воздействуя на регулирующий орган своего канала регулирования (отклонения температуры потока печи), также действует на регулирующие органы других регулируемых величин.

Связи между регулируемыми величинами управляемого объекта каждого потока печи обусловлены наличием общих для регулируемых величин возмущений и общих регулирующих воздействий. На каждую выходную переменную действует добавочное возмущение от входных переменных (расходов по другим потокам) по каналам с соответствующими передаточными функциями.

Однако, как показал анализ исходных данных (характеристик объекта управления), эти добавочные возмущения незначительно ухудшают качество функционирования каждого канала регулирования в связи с меньшими по сравнению с основным входным воздействием коэффициентами переда-

чи. Поэтому представлялось нецелесообразным реализовать компенсирующие связи между регуляторами для того, чтобы изолировать регулируемые величины каждого из каналов от процессов в других потоках печи, т. е. рассматривать процессы регулирования в потоках печи автономно.

Таким образом, при проектировании и практической реализации системы регулирования многопоточной печи как многомерного объекта использовались методы, применяемые для одномерных систем. Для технической реализации была принята структура системы, при которой каждую регулируемую величину (отклонение температуры потока печи) контролирует только один одномерный регулятор.

При этом в многосвязной системе управления проверка функционирования регуляторов (выравнивания температур потоков) осуществлялась при их совместной работе. Необходимость такого решения обусловлена также тем, что среди взаимопересекающихся замкнутых контуров многомерного объекта присутствуют контуры с положительной обратной связью (из-за добавочных возмущений от процессов в других потоках печи).

Регулирование выравнивания температур потоков осуществляется изменением расходов потоков (загрузкой печи). При этом изменение расходов потоков влияет как на температуры потоков, так и на общий расход через печь.

Следует отметить, что канал регулирования общего (суммарного) расхода, который был введен в MCP, является быстродействующим по сравнению с каналами регулирования выравнивания температур потоков. Это обстоятельство позволяет строить системы регулирования расхода и температур потоков как независимые друг от друга системы.

Разработанная MCP предназначена для того, чтобы реализовать функцию супервизорного управления: непрерывно формировать уставки локальным регуляторам потоков (на основе информации о контролируемых выходных параметрах), обеспечивая оптимизацию технологических процессов многопоточной печи. При этом непрерывное автоматическое поддержание минимальной разности между температурами потоков печи обеспечивает повышение эффективности управления.

4.3. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ УПРАВЛЕНИЯ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МСР

Для того чтобы сформулировать требования к системе управления многопоточной печью и поставить задачу проектирования супервизорной системы управления процессами, рассмотрим, как были реализованы контуры регулирования для потоков печи.

На рис. 4.1 приведена схема системы регулирования многопоточной печи, где уставки (задания) контурам регулирования потоков задаются оператором.

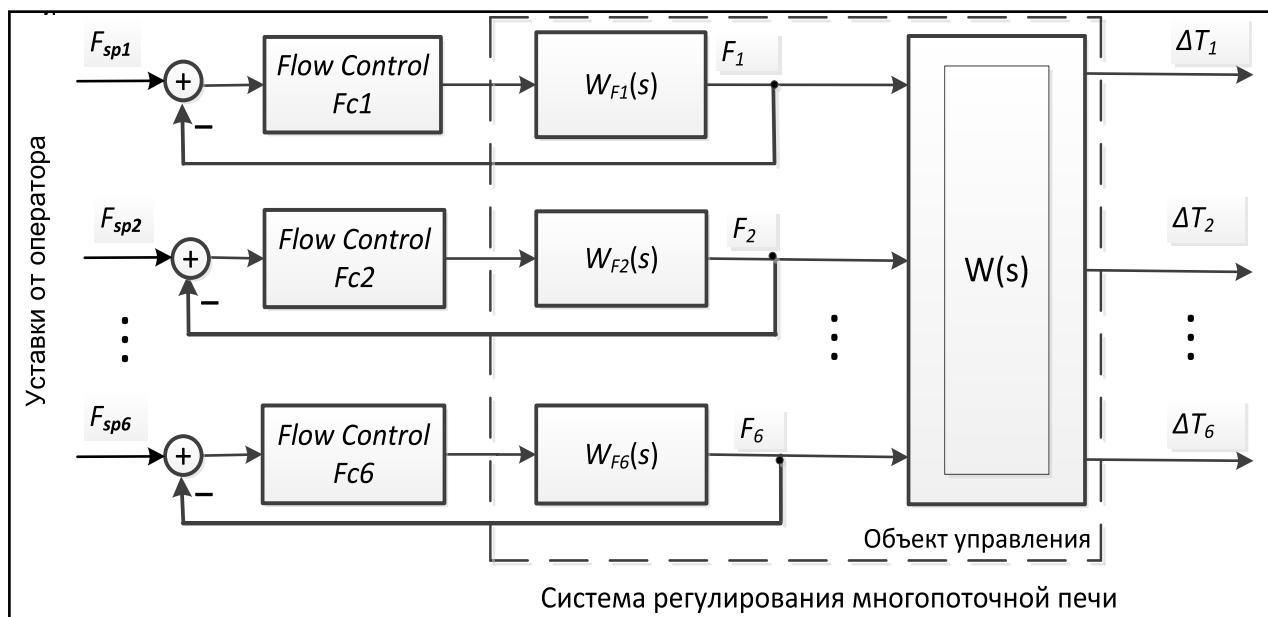


Рис. 4.1. Схема существующей системы регулирования многопоточной печи

Как показано на схеме, управление потоками осуществляется формированием уставки для каждого из потоков печи F_{sp1} – F_{sp6} (для 6-поточной печи). Сформированные уставки используются существующими в системе пропорционально-интегрально-дифференциальными (ПИД) контурами, обеспечивающими управление потоками печи F_1 – F_6 ($Fc1$ – $Fc6$ – Flow Control).

В качестве выходных параметров объекта используются разности (отклонения) температур между заданным значением TRC1-6 (для 4-поточной печи – TRC1-4) и температурами потоков каждого из змеевиков печи $T_{i1} - T_{i6}$ ($T_{i1} - T_{i4}$), обозначенные $\Delta T_1 - \Delta T_6$ ($\Delta T_1 - \Delta T_4$).

В MCP (как супервизорной системы) для управления потоками должно быть реализовано автоматическое формирование уставок для каждого из потоков печи $Fsp_1 - Fsp_6$ (вместо уставок, вводимых оператором).

Для разработки супервизорной системы управления необходимо создать модель управляемого объекта. В структурном отношении модель многопоточной печи состоит из многомерных звеньев.

Линейное многомерное звено, соответствующее каналам управления «расход потока – отклонение температуры потока», описывается матричным соотношением вида

$$\Delta \mathbf{T}(s) = \mathbf{W}(s)\mathbf{F}(s), \quad (4.1)$$

где $\mathbf{F}(s)$, $\Delta \mathbf{T}(s)$ – векторы-столбцы изображений входных и выходных величин.

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(s) &= \{F_1(s), F_2(s), \dots, F_n(s)\}^T; \\ \Delta \mathbf{T}(s) &= \{\Delta T_1(s), \Delta T_2(s), \dots, \Delta T_n(s)\}^T; \quad 2 \leq n \leq 6, \end{aligned}$$

где индекс « T » обозначает операцию транспонирования; s – оператор Лапласа.

Кроме того, в выражении (4.1) присутствует $\mathbf{W}(s)$ – матричная передаточная функция, т. е. матрица, элементами которой являются передаточные функции отдельных каналов звена:

$$\mathbf{W}(s) = \begin{bmatrix} W_{11}(s), W_{12}(s), \dots, W_{1j}(s), \dots, W_{1n}(s) \\ W_{21}(s), W_{22}(s), \dots, W_{2j}(s), \dots, W_{2n}(s) \\ \dots \\ W_{i1}(s), W_{i2}(s), \dots, W_{ij}(s), \dots, W_{in}(s) \\ \dots \\ W_{n1}(s), W_{n2}(s), \dots, W_{nj}(s), \dots, W_{nn}(s) \end{bmatrix}.$$

Передаточные функции отдельных каналов звена, соответствующие каналам управления «расход – отклонение температуры потока», описываются соотношениями вида

$$W(s) = K_{ij} \frac{Tf_{ij}s + 1}{T_{2_ij}s^2 + T_{1_ij}s + 1} e^{-\tau_{ij}s}; i = \overline{1, n}; j = \overline{1, n},$$

где K_{ij} – коэффициент передачи по каналу управления; $Tf_{ij}, T_{2_ij}, T_{1_ij}$ – постоянные времени; τ_{ij} – время запаздывания для каждого канала управления «расход i -го потока F_i – «частичное» отклонение температуры j -го потока T_{ij} ».

Выходом объекта является отклонение температуры j -го потока (сумма «частичных» отклонений, обусловленных изменениями F_i):

$$\Delta T_j = \sum_i T_{ij}; i = \overline{1, 6}.$$

Для разработки МСР необходимо проанализировать объект управления с точки зрения входов и выходов (как это иллюстрирует рис. 4.2).

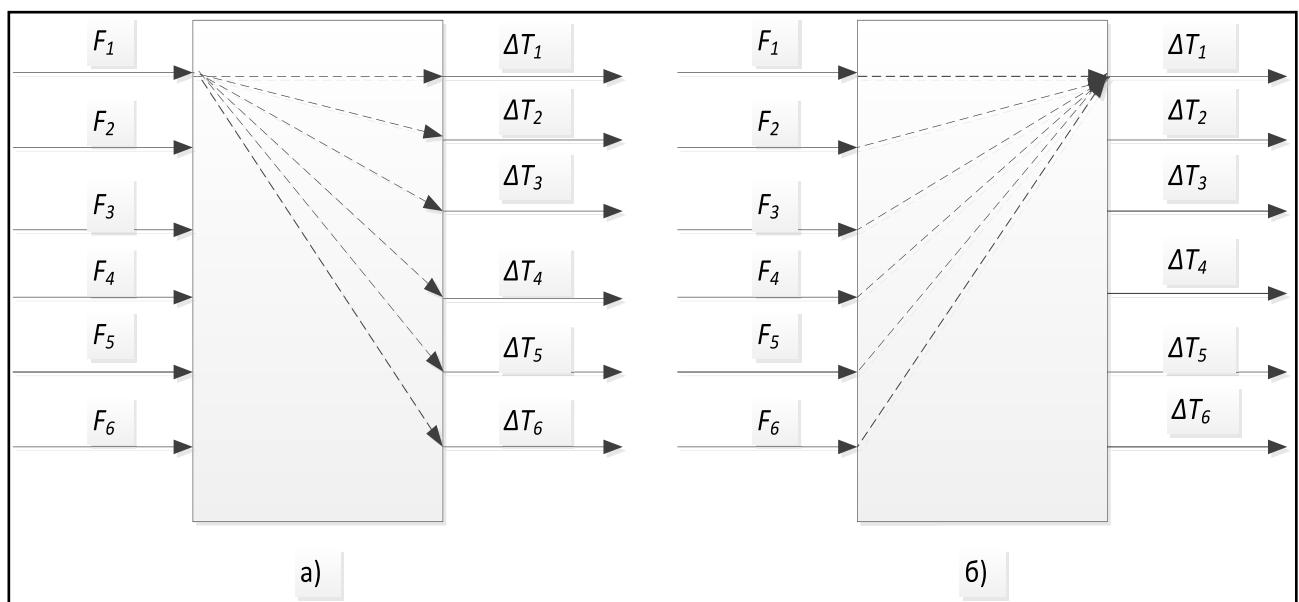


Рис. 4.2. Проявление связности многопоточной печи как объекта управления:

a – воздействие каждого входа $F_i, i = \overline{1, n}$, на все выходы $\Delta T_1 - \Delta T_n$;

b – воздействие всех входов $F_1 - F_6$ на каждый выход $\Delta T_j; j = \overline{1, 6}$

Следует пояснить, что здесь два определяющих явления рассматриваются как результат связности многопоточной печи:

- каждый вход $F_i, i = \overline{1, n}$, действует на все выходы $\Delta T_1 - \Delta T_6$ (рис. 4.2, а);
- все входы $F_1 - F_6$ действуют на каждый выход $\Delta T_j; j = \overline{1, 6}$ (рис. 4.2, б).

Кроме того, контур управления суммарным потоком печи, функционирующий на основе отклонения суммарного потока F_Σ от заданного значения $F_{sp\Sigma}$ (формируется как сумма уставок для каждого потока, вводимых оператором), также участвует в формировании заданий для каждого из потоков печи $F_{sp1} - F_{sp6}$.

Таким образом, уставки для каждого из потоков печи $F_{sp1} - F_{sp6}$ (на основе которых существующие ПИД-контуры обеспечивают управление потоками $F_1 - F_6$) формируются в зависимости, как от отклонения суммарного потока печи, так и от отклонений температур потоков от своих заданных значений.

При проектировании МСР выдвигаются следующие требования. Необходимо минимизировать отклонения температур потоков каждого из змеевиков печи от среднего значения:

$$\Delta T_j \rightarrow \min; j = \overline{1, n}, 2 \leq n \leq 6, \quad (4.2)$$

а также обеспечить поддержание заданного значения суммарного потока печи:

$$\Delta F_\Sigma = \left(\sum_i F_{spi} - \sum_i F_i \right) \rightarrow \min, i = \overline{1, n}, n = 6 (n = 4). \quad (4.3)$$

Таким образом, выполняющая эти требования супервизорная система управления многопоточной печью осуществляет формирование уставок для локальных регуляторов потоков, для того чтобы автоматически поддерживать минимальную разность между температурами по-

токов (обеспечивая при этом поддержание заданного суммарного потока печи).

Рассмотрим решение задачи проектирования MCP как супервизорной системы управления многопоточной печью, формирующей уставки для регуляторов потоков, на примере системы, реализованной на основе традиционных линейных регуляторов.

4.4. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ – ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МНОГОПОТОЧНОЙ ПЕЧИ

Моделирование процессов в системах управления является одной из основных задач, решаемых на начальном этапе проектирования системы. При создании моделей технологических процессов выполняется параметризация моделей и определяются параметры моделей по экспериментальным данным [8, 18, 22, 26, 29, 32].

На этапе параметризации на основе априорных данных о ТП разрабатывается его модель, определяется ее структура и число параметров. При этом принимается во внимание, что динамические модели ТП на практике приближенно представляются полиномами первой или второй степени [12–18, 22–26, 38]. На этапе определения параметров моделей обрабатывается информация о динамических характеристиках систем и производится статистическая обработка экспериментальных данных, полученных с объектов управления.

Для иллюстрации изложения материала на рис. 4.3 и 4.4 представлена схема моделирования объекта регулирования – многопоточной печи (с четырьмя потоками), а на рис. 4.5 приведены переходные процессы для 4-поточной печи, полученные при моделировании и проведении тестовых испытаний.

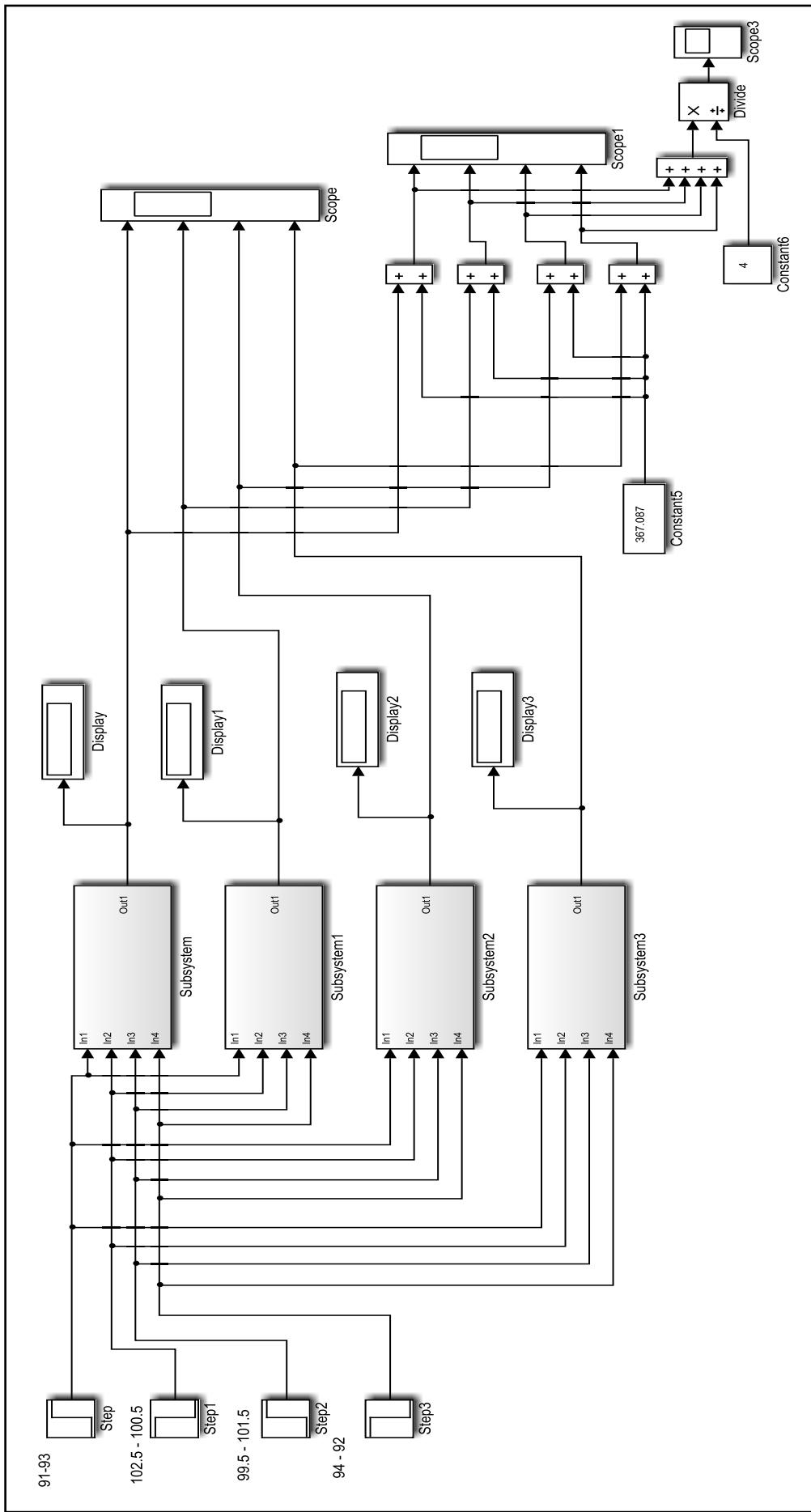


Рис. 4.3. Схема моделирования объекта регулирования – многопоточной печи

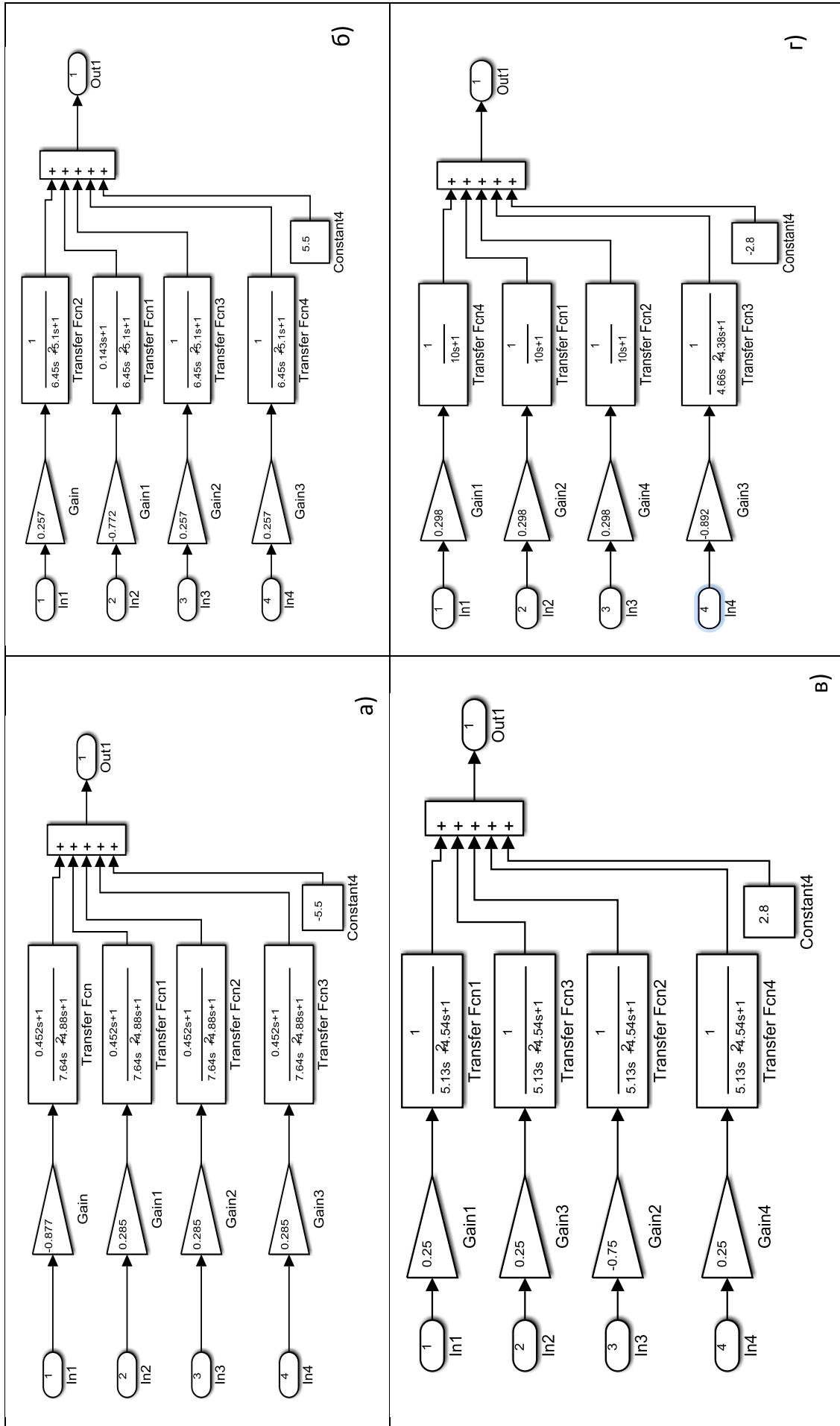


Рис. 4.4. Схемы моделирования потоков многопоточной печи (с 1 по 4)

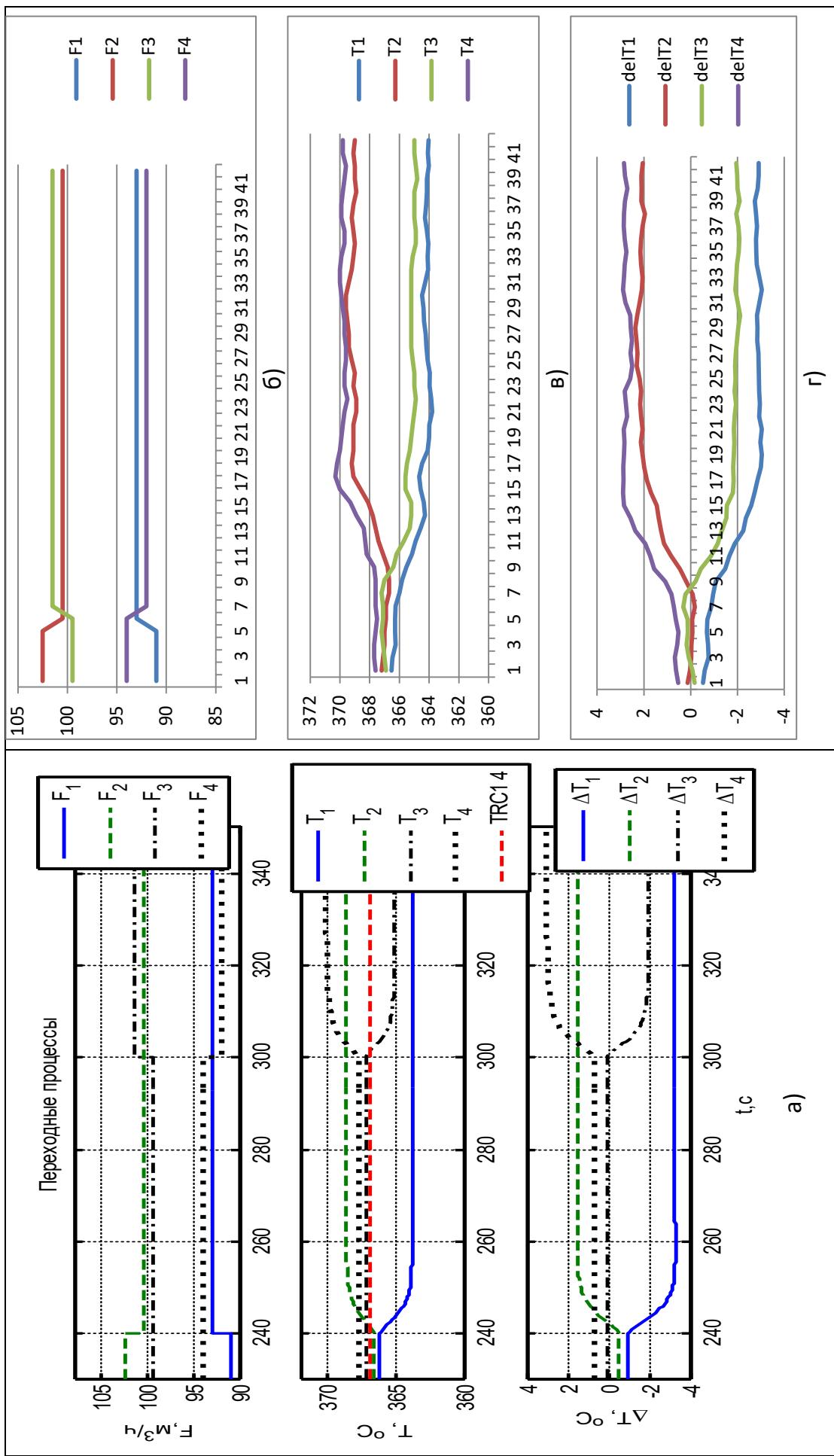


Рис. 4.5. Переходные процессы 4-поточной печи:

a – полученные при моделировании; δ – при тестовых испытаниях

Так как информация о протекании ТП в действующих системах управления регистрируется и архивируется информационно-вычислительными системами, то имеется возможность ее использовать в качестве исходных данных для разработки математических моделей объектов управления.

На основе архивной информации (массивы входных/выходных сигналов систем автоматического регулирования) получены данные о динамических характеристиках систем и данные, используемые для построения моделей случайных возмущений.

На основе исходных данных для 4-поточной печи в интерактивной среде MATLAB/Simulink разработана математическая модель объекта регулирования (см. рис. 4.3), которая содержит подсистемы Subsystem (Subsystem1 - 3), представляющие модели потоков печи (схемы представлены для потоков 1–4 на рис. 4.4, *a*–*г*, соответственно).

В результате проведения модельных исследований получено подтверждение корректности предоставленных исходных данных (полученных при натурных тестовых испытаниях): наблюдается соответствие переходных характеристик каналов регулирования.

Характер переходных процессов, полученных при моделировании (рис. 4.5, *a*), соответствует результатам тестовых испытаний (рис. 4.5, *б*–*г*). Так, переходные процессы, полученные при тестовых испытаниях: изменения заданных расходов потоков (рис. 4.5, *б*), изменения температур потоков (рис. 4.5, *в*), изменения отклонений температур потоков от среднего значения (рис. 4.5, *г*), соответствуют таким же характеристикам, полученным при моделировании (рис. 4.5, *a*).

В результате анализа получено, что погрешности определения амплитуд выходных сигналов и постоянных времени передаточных функций не превышают 5 %.

4.5. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МНОГОСВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим вариант разработки MCP, реализующей супервизорное управление многопоточной печью на основе традиционных линейных регуляторов. Супервизорная система, являющаяся надстройкой над существующими контурами управления, осуществляет формирование уставок для локальных регуляторов потоков. Система обеспечивает автоматическое поддержание минимальной разности между температурами потоков, а также поддержание заданного суммарного потока печи.

Схема модели MCP в среде MATLAB/Simulink приведена на рис. 4.6. Система супервизорного управления выполнена на основе каскадного ПИ-регулирования. В составе математической модели MCP подсистема Subsystem4 реализует модель объекта регулирования – 4-поточной печи, описанную в п. 4.4. Заданное значение $F_{sp\Sigma}$ формируется как сумма заданий для каждого потока, т. е. уставок, вводимых оператором.

Следует иметь в виду, что контур управления суммарным потоком печи, функционирующий на основе отклонения суммарного потока F_Σ от заданного значения $F_{sp\Sigma}$, является более быстродействующим по сравнению с контурами регулирования отклонений температур потоков ΔT_j , $j = \overline{1, 4}$.

В соответствии с этим выбираются параметры настройки ПИ-регуляторов, чтобы развязать во времени работу контуров регулирования суммарного потока печи и отклонений температур потоков.

Рис. 4.7 и 4.8 иллюстрируют модельные исследования MCP. Приведены результаты моделирования процессов для двух вариантов: выполнение выравнивания температур потоков без управления (1) и с управлением (2) суммарным потоком печи.

Как можно видеть на рис. 4.7 (переходные процессы без управления расходом), выравнивание температур потоков (после внесенных возмущений заданиями для потоков печи) осуществляется регуляторами, но при этом суммарный расход потока падает (так как регулятор потока отключен).

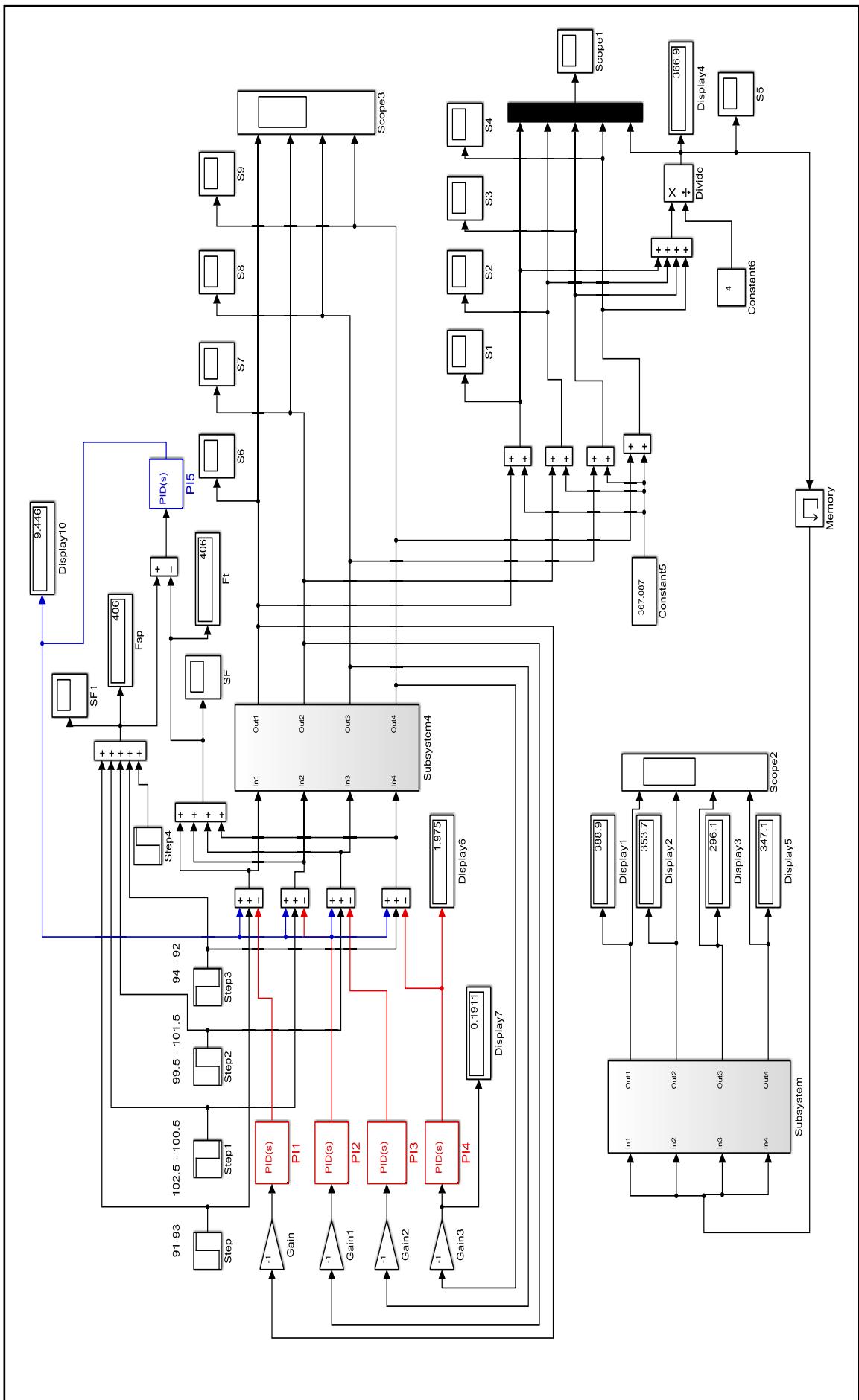


Рис. 4.6. Супервизорное управление MCP на основе каскадного ПИ-регулирования. Схема модели в среде MATLAB/Simulink

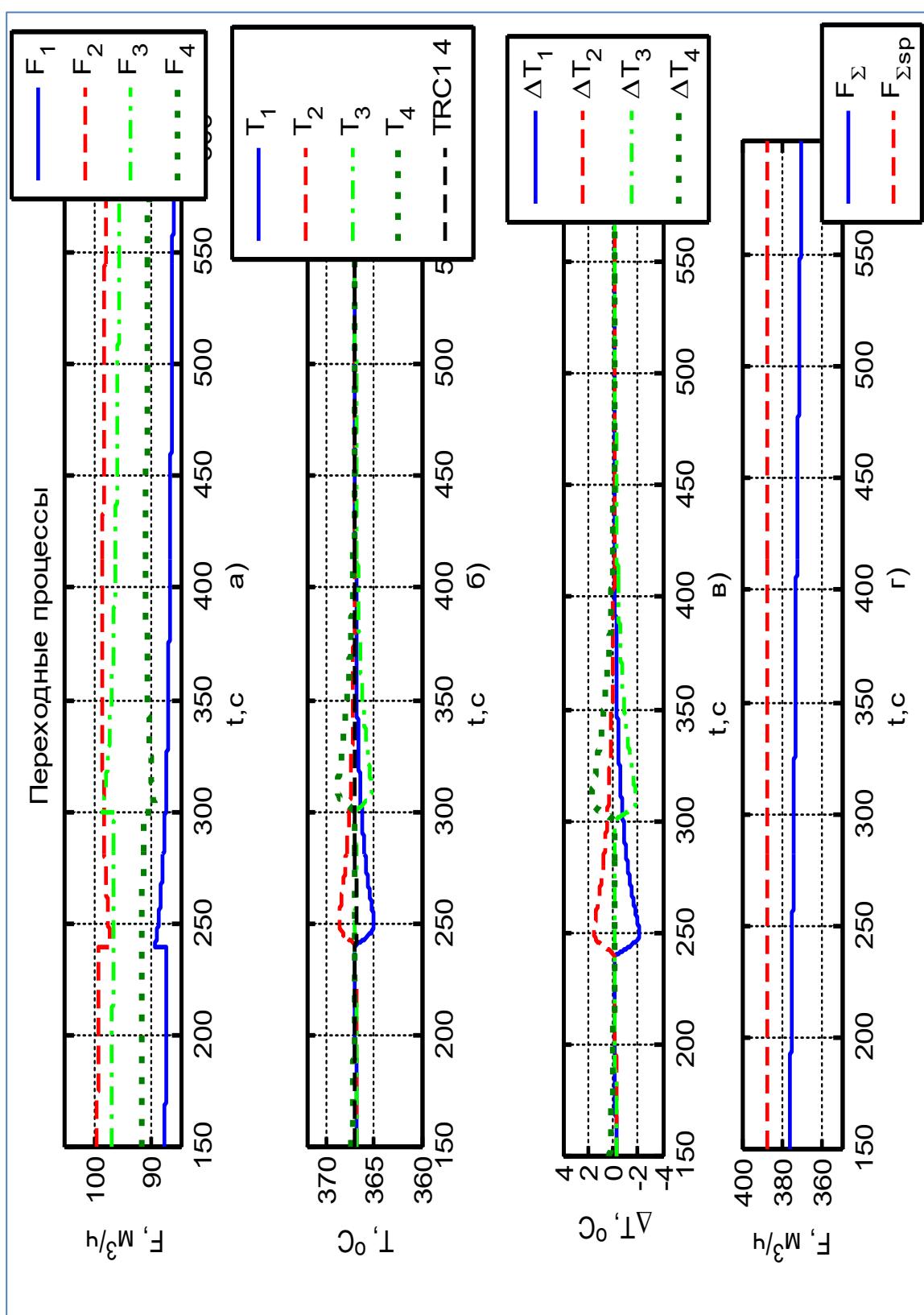


Рис. 4.7. Переходные процессы при каскадном ПИ-регулировании (без управления расходом – расход падает)

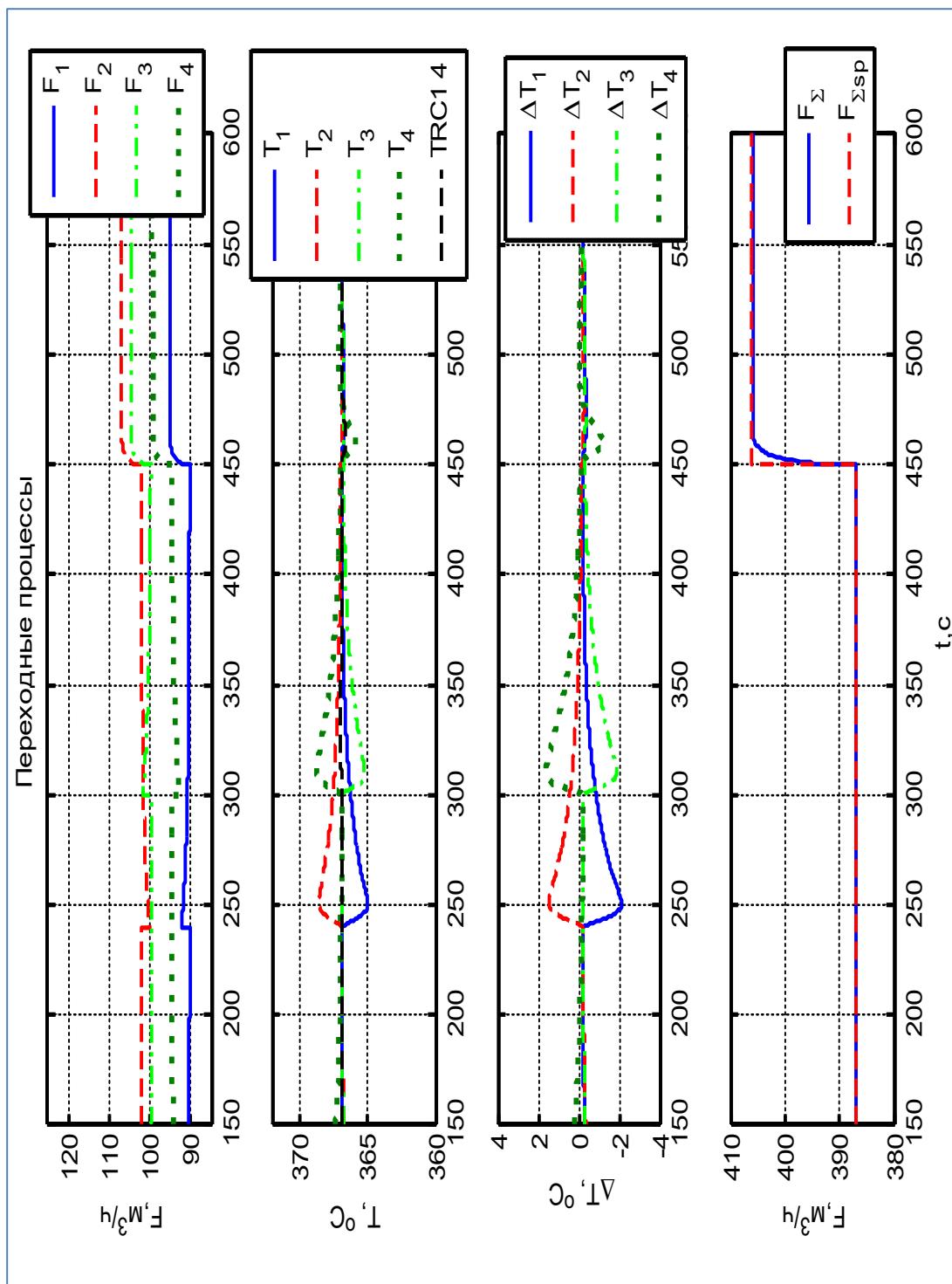


Рис. 4.8. Переходные процессы при каскадном ПИ-регулировании
(с управлением расходом – отрабатывается возмущение заданием расхода на 450 с)

Переходные процессы в случае каскадного ПИ-регулирования с управлением суммарным потоком печи представлены на рис. 4.8.

Здесь иллюстрируется хорошее качество регулирования: системой отрабатываются возмущения (заданием локальных расходов по каналам оператором на 200-й и 300-й секундах) – отклонения температур не превышают 2 °С, и устраняются менее чем за 200 секунд.

Кроме того, системой отрабатывается введенное на 450-й секунде дополнительное воздействие (кроме уставок, вводимых оператором) – возмущение заданием расхода на 5 % от исходного значения.

Отметим, что многопоточные печи установок нефтеперерабатывающих производств характеризуются сложным технологическим процессом. Состояние такого процесса определяется большим числом управляемых величин, имеющих различную физическую природу, постоянно изменяющихся под воздействием случайных неконтролируемых факторов.

Достоинством рассмотренной системы, реализующей супервизорное управление многопоточной печью на основе традиционных ПИ-регуляторов, является то, что требуется настроить небольшое количество параметров для обеспечения эффективного управления процессом. Кроме того, линейные регуляторы достаточно изучены, а методы линейной теории для их исследования и анализа устойчивости хорошо развиты.

Однако следует иметь в виду, что даже оптимально настроенным (по принятым критериям) ПИ-регулятором обеспечивается протекание ТП в режиме, близком к оптимальному, в случае, если параметры объекта управления известны с высокой точностью и работа объекта не подвержена влиянию ухудшающих протекание процесса случайных факторов.

При разработке системы управления многопоточной печью как сложным технологическим процессом надо учитывать требования по обеспечению высокого качества регулирования в случае действия на объект различных возмущений.

Поэтому при создании системы следует рассмотреть целесообразность применения современных информационных технологий, позволяю-

щих в значительной степени снять ограничения на достижимое качество управления, обусловленные неполнотой априорной информации об объекте управления.

4.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Задание 1. Выполните модельные исследования системы супервизорного управления технологическими процессами многопоточной печи нефтеперерабатывающей установки. Рассмотрите многосвязную систему автоматического регулирования 4-поточной печи, позволяющую осуществлять автоматическую стабилизацию выходных параметров объекта. Супервизорное управление выполняется МСР на основе использования традиционных линейных регуляторов – каскадного ПИ-регулирования.

Исследуемая МСР должна минимизировать отклонения температур потоков каждого из змеевиков печи от среднего значения (в соответствии с выражением (4.2)), обеспечивая поддержание заданного значения суммарного потока печи (в соответствии с (4.3)). Для проведения модельных исследований выполните следующие действия.

Создайте в среде MATLAB / Simulink схему модели системы супервизорного управления многопоточной печью на основе каскадного ПИ-регулирования в соответствии с рис. 4.9 (с учетом рис. 4.10 и 4.4). Сохраните файл под именем P1_23tcp.slx.

Значения скрытых параметров настройки указаны около блоков. Так, например, для изменения расхода первого потока в настройках блока Step установите $t = 240$ с – момент времени скачкообразного изменения выходного сигнала (с начального значения $F_1 = 91 \text{ м}^3/\text{ч}$ до конечного значения $F_1 = 93 \text{ м}^3/\text{ч}$). Для изменения расходов остальных потоков в настройках блоков Step1–3 установите параметры аналогично (значения параметров указаны возле этих блоков на схеме, см. рис. 4.9).

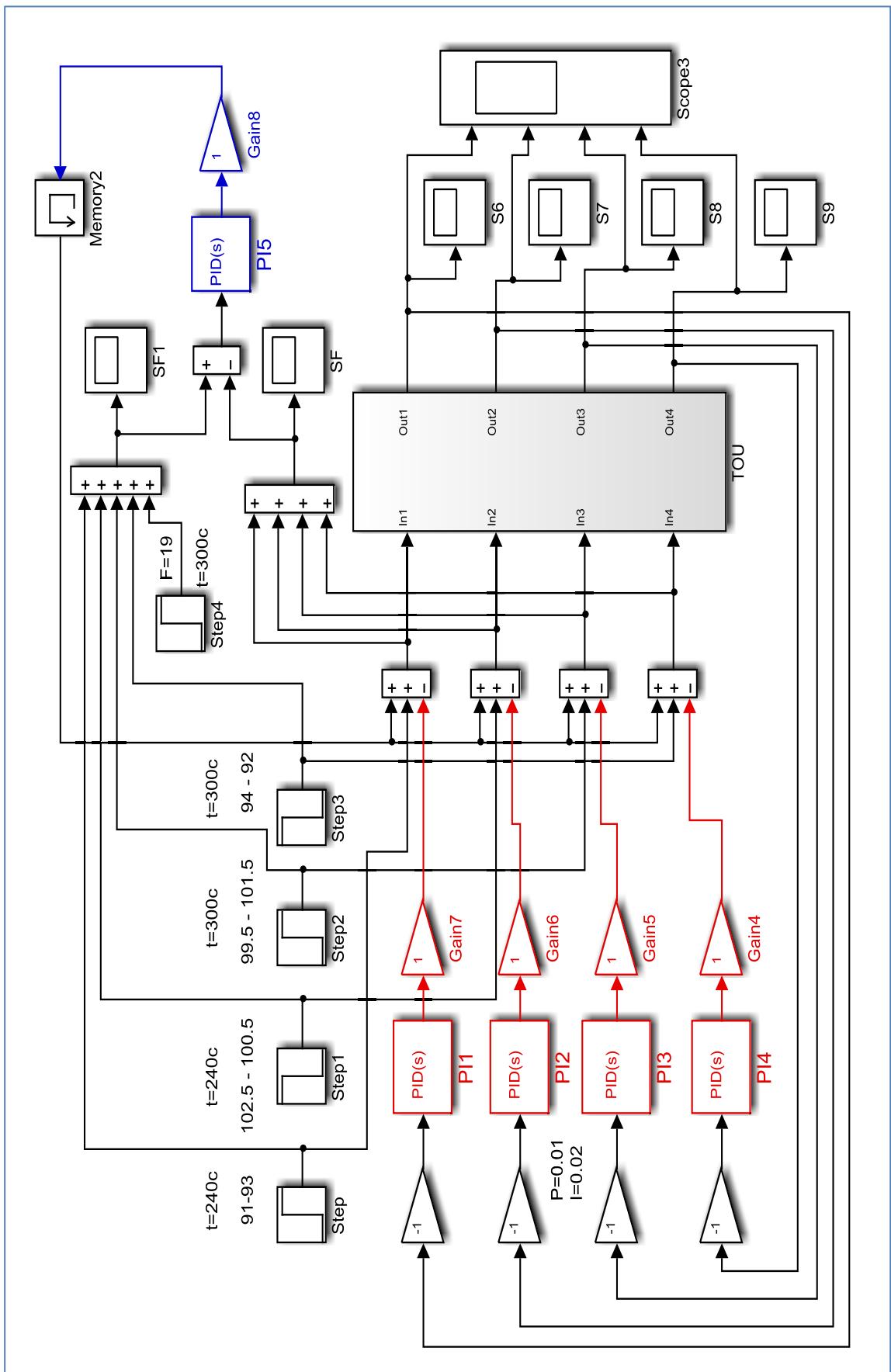


Рис. 4.9. Схема модели супервизорного управления MCP на основе каскадного ПИ-регулирования (файл Р1_23mcpr.slx)

При создании схемы для вывода результатов расчета на соответствующие графики предусмотрите сохранение параметров в рабочую область, используя окна настройки соответствующих блоков Scope (см. рис. 4.9):

- 1) для текущего значения суммарного расхода – блок SF (массив SF);
- 2) для заданного значения суммарного расхода – блок SF1 (массив SF1);
- 3) для отклонения температуры потока 1 – блок S6 (массив S6);
- 4) для отклонения температуры потока 2 – блок S7 (массив S7);
- 5) для отклонения температуры потока 3 – блок S8 (массив S8);
- 6) для отклонения температуры потока 4 – блок S9 (массив S9).

В окне настройки каждого блока, используя подменю History, надо выбрать пункт Save data to workspace, ввести имя соответствующего параметра и назначить формат Array (массив).

В контурах регулирования температур потоков в настройках блоков PID Controller установите параметры: P = 0.1 (Proportional), I = 0.02 (Integral), D = 0 (Derivative), N = 100 (Filter coefficient), обеспечивая ПИ-закон регулирования.

На рис. 4.10 приведена схема подсистемы ТОУ – модели объекта регулирования, которым является многопоточная печь.

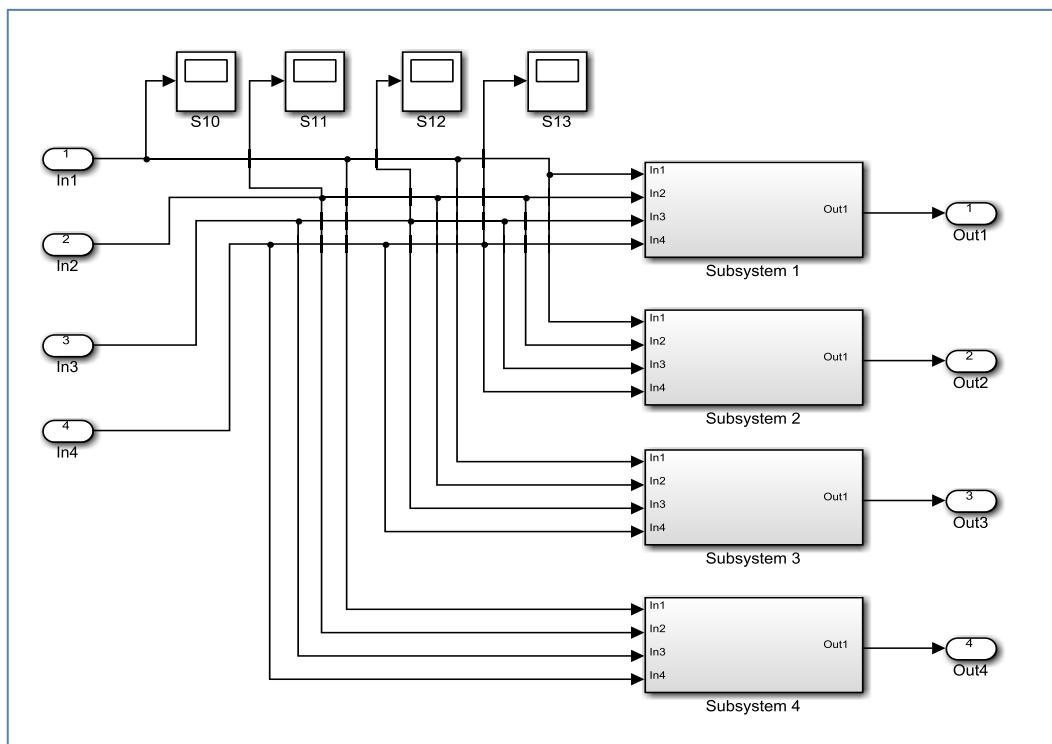


Рис. 4.10. Схема подсистемы ТОУ (модели объекта – многопоточной печи)

При создании схемы подсистемы TOU для вывода результатов расчета на графики предусмотрите сохранение параметров в рабочую область, используя окна настройки соответствующего блока Scope (см. рис. 4.10): для текущих значений расходов потоков 1–4 в блоках S10 – S13 (назовите массивы S10–S13 соответственно).

Подсистемы Subsystem1–4, выполняющие вычисления температур потоков печи и их отклонений от среднего значения, необходимо реализовать в соответствии со схемами, приведенными на рис. 4.4, а–г.

Создайте скрипт-файл для выполнения моделирования многосвязной системы автоматического регулирования многопоточной печи, а также для расчета и визуализации переходных процессов (в соответствии с рис. 4.11) и сохраните под именем MCP1_23.m.

```
%MPC
clc
clear all
open_system('P1_23mcp')
sim('P1_23mcp',600)
figure
subplot(3,1,1);
hLines=plot(S10(:,1),S10(:,2),S11(:,1),S11(:,2),'r--',...
    S12(:,1),S12(:,2),'g-.',S13(:,1),S13(:,2),':');
set(hLines(1),'LineWidth',2); set(hLines(2),'LineWidth',2)
set(hLines(3),'LineWidth',2); set(hLines(4),'LineWidth',2.5);
grid on
axis([150 600 85 125])
legend('F_1','F_2','F_3','F_4');
title('Переходные процессы','FontSize',10);
ylabel('F, м^3/ч'); set(gca,'LineWidth',2)
%
subplot(3,1,2);
hLines=plot(S6(:,1),S6(:,2),S7(:,1),S7(:,2),'r--',...
    S8(:,1),S8(:,2),'g-.',S9(:,1),S9(:,2),':');
set(hLines(1),'LineWidth',2); set(hLines(2),'LineWidth',2)
set(hLines(3),'LineWidth',2); set(hLines(4),'LineWidth',2.5);
grid on
axis([150 600 -4 4])
legend('\DeltaT_1','\DeltaT_2','\DeltaT_3','\DeltaT_4');
ylabel('\DeltaT, ^oC'); set(gca,'LineWidth',2)
```

Рис. 4.11. Файл-сценарий для моделирования MCP и расчета переходных процессов (скрипт MCP1_23.m) (начало)

```

    subplot(3,1,3);
    hLines=plot(SF(:,1),SF(:,2),SF1(:,1),SF1(:,2),'r--');
    set(hLines(1), 'LineWidth',2); set(hLines(2), 'LineWidth',2)
    grid on;
    axis([150 600 360 420])
    legend('F_\Sigma','F_\Sigma_s_p'); xlabel('t,c'),
    ylabel('F, м^3/ч'); set(gca,'LineWidth',2)

```

Рис. 4.11. Файл-сценарий для моделирования MCP и расчета переходных процессов (скрипт MCP1_23.m) (окончание)

Поместите созданные файлы (MCP1_23.m и P1_23mcp.slx) в одну директорию. Вызовите на выполнение файл-сценарий MCP1_23.m, осуществляющий вызов Simulink-модели MCP – P1_23mcp.slx, а также реализующий построение графиков переходных процессов в системе.

В результате выполнения расчетов получите графики переходных процессов (в соответствии с рис. 4.12).

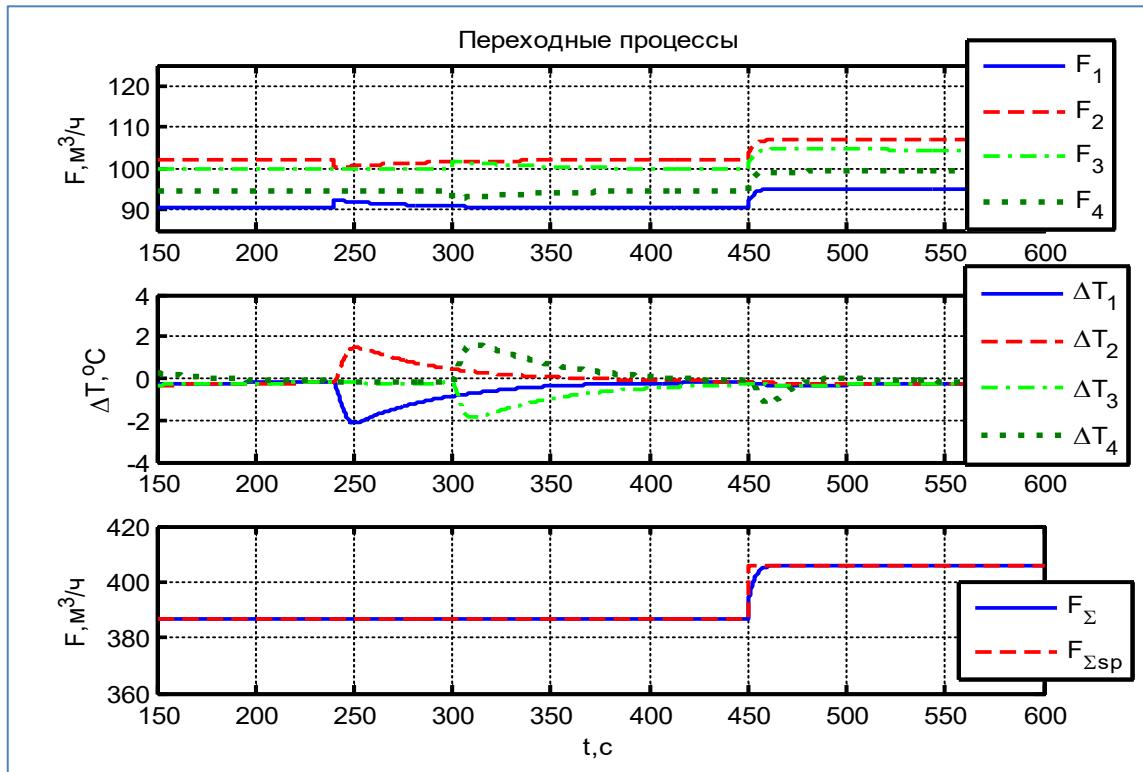


Рис. 4.12. Графики переходных процессов в случае каскадного ПИ-регулирования при формировании уставок температур потоков супервизорной системой

Как видно на представленных графиках, переходные процессы, полученные в результате моделирования МСР многопоточной печи, характеризуются хорошим качеством: при возмущении заданным значением суммарного расхода (на 450-й секунде) обеспечивается выход на заданное значение расхода без перерегулирования и его поддержание.

При этом регуляторами температуры возмущения расходами в потоках (на 240-й и 300-й секундах) также отрабатываются (максимальные отклонения температур в потоках не превышают $\pm 2^{\circ}\text{C}$).

Измените настройки в контурах регулирования, проведите расчеты и дайте оценку полученным переходным процессам.

Отключите контур управления расходом, выполните расчеты и охарактеризуйте полученные переходные процессы в контурах регулирования (рис. 4.13). Сравните их с графиками на рис. 4.7 – переходные процессы без управления расходом.

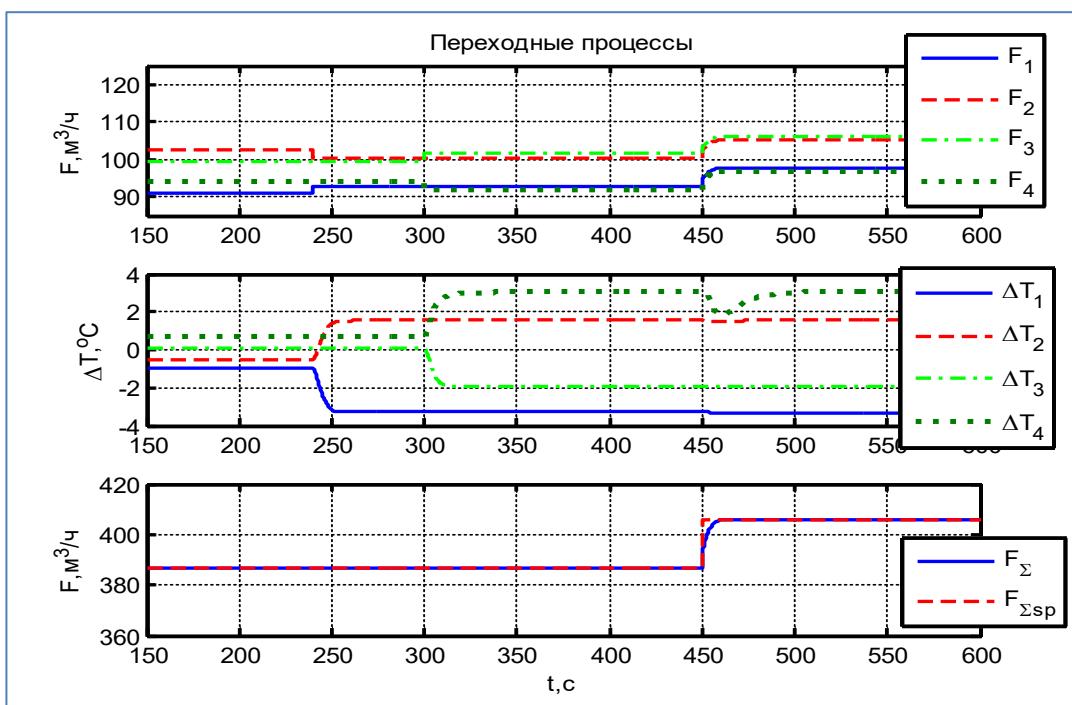


Рис. 4.13. График переходных процессов каскадного ПИ-регулирования при отключении от управления (без формирования уставок супервизорной системой) четырех каналов

Из рисунков видно, что возмущения отрабатываются за небольшое время, обеспечивая быстрое выравнивание температур потоков (поддержание заданного суммарного расхода осуществляется в обоих случаях).

Задание 2. Выполните проверку функционирования MCP в соответствии с методикой испытаний (предназначенной для верификации ПО MCP), представленной в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Процедуры проверки и методика испытаний модели MCP (4-поточная печь)

Процедура проверки	Методика испытаний	Критерии оценки / ожидаемый результат
1. Проверка возможности управления технологическим процессом многопоточной печи, обеспечивающая выравнивание температур потоков печи	<p>Проверить возможность управления технологическим процессом многопоточной печи с выполнением выравнивания температур потоков:</p> <p>а) загрузить и вызвать на выполнение т-файл-сценарий MCP1_23.m;</p> <p>б) контролировать выполнение моделирования работы MCP: выравнивание температур потоков печи на экранах мониторов Scope (в окнах S6–S9);</p> <p>в) контролировать выравнивание температур потоков печи на графиках технологических параметров (Figure)</p>	Поддержание отклонений температур потоков печи с точностью до принятой величины статической ошибки ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$)
2. Проверка возможности управления печью по двум параметрам (общий расход через печь и температура на выходе из печи)	<p>Проверить возможность управления печью по двум параметрам: с поддержанием заданного расхода через печь и температуры на выходе из печи:</p> <p>а) загрузить и вызвать на выполнение т-файл-сценарий MCP1_23.m;</p> <p>б) контролировать выполнение моделирования работы MCP: выравнивание температур потоков печи на экране монитора Scope (в окнах S6–S9);</p> <p>в) контролировать поддержание суммарного расхода печи на экране монитора (в окне Scope SF);</p> <p>г) контролировать выравнивание температур потоков печи на графиках технологических параметров (Figure)</p>	<p>Поддержание отклонений температур потоков печи с точностью до принятой величины статической ошибки ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$).</p> <p>Поддержание заданного значения суммарного расхода печи с точностью до принятой величины статической ошибки ($\pm 1 \text{ m}^3/\text{ч}$)</p>

Процедура проверки	Методика испытаний	Критерии оценки / ожидаемый результат
3. Проверка возможности изменения заданий по процессу (уставок технологических параметров)	<p>Проверить возможность изменения задания (уставки) для суммарного расхода в печь:</p> <p>а) загрузить и вызвать на выполнение т-файл-сценарий MCP1_23.m;</p> <p>б) контролировать значения задания, установленного в модели;</p> <p>в) контролировать выполнение моделирования работы MCP (в окнах Scope1, Scope3);</p> <p>г) контролировать поддержание суммарного расхода печи на экране монитора (в окне Scope SF);</p> <p>д) изменить в исходных данных уставку для суммарного расхода на 5–10 % от исходного значения (для возмущения расходом установить параметры t0, stepF);</p> <p>е) контролировать увеличение (уменьшение) значения задания на 5–10 % на графике изменения расхода (Figure);</p> <p>ж) контролировать переход регулируемого параметра на заданное значение (в окне Scope SF);</p> <p>з) контролировать поддержание суммарного расхода на заданном уровне (в окне Scope SF);</p> <p>и) контролировать выравнивание температур потоков печи на графиках технологических параметров (Figure)</p>	<p>Изменение уставки для суммарного расхода печи на 5–10 % от исходного значения.</p> <p>Переход на заданное значение и поддержание заданного значения суммарного расхода печи с точностью до принятой величины статической ошибки ($\pm 1 \text{ м}^3/\text{ч}$).</p> <p>Поддержание отклонений температур потоков печи с точностью до принятой величины статической ошибки ($\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$)</p>

Окончание табл. 4.1

Процедура проверки	Методика испытаний	Критерии оценки / ожидаемый результат
4. Проверка возможности исключения/добавления одного или более потоков из/в управление без нарушения работоспособности модели MCP.	<p>Проверить возможность исключения/добавления одного или более потоков из/в управление без нарушения работоспособности модели MCP; минимальное количество потоков для управления – 2, максимальное – 4:</p> <p>а) загрузить Simulink-модель P1_23mcp.slx;</p> <p>б) имитировать исключение (добавление) одного или более потоков из/в управление, назначив в модели в окрашенных блоках Gain8 – Gain14 (для управления температурой потока) и соответствующих блоках Gain5, Gain6 и Gain25 – Gain28 (для управления расходом потока) значения Gain=0 (Gain=1);</p> <p>в) вызвать на выполнение Simulink-модель P1_23mcp.slx;</p> <p>г) контролировать исключение (добавление) одного или более потоков из/в управление на графиках формирования уставок расходов потоков (в подсистеме CONTROL OBJECT, в окнах Scope Sf10-Sf15);</p> <p>д) контролировать выполнение моделирования работы MCP (в окнах Scope);</p> <p>е) контролировать погрешность поддержания суммарного расхода на заданном уровне (Scope SF);</p> <p>з) контролировать выравнивание температур управляемых потоков печи на графиках технологических параметров (Figure)</p>	<p>Постоянное значение уставки для расходов неуправляемых потоков при имитации исключения (добавления) одного или более потоков из/в управления.</p> <p>Поддержание заданного значения суммарного расхода печи с погрешностью, превышающей принятую точность (величина статической ошибки $\pm 1 \text{ м}^3/\text{ч}$).</p> <p>Поддержание отклонений температур управляемых потоков печи с точностью до принятой величины статической ошибки ($\pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$)</p>

Убедитесь, что экспериментальные процедуры проверки функций модели MCP позволяют определить технические особенности и возможности MCP.

Обоснуйте вывод, что использование супервизорного регулирования представляется целесообразным для проектирования MCP.

Контрольные вопросы

1. Дайте характеристику многомерного объекта управления.

2. В чем заключается назначение системы многосвязного управления?

Объясните, что такое принцип автономности.

3. В чем сущность супервизорного регулирования? Чем обусловлена необходимость его реализации при управлении многопоточной печью?

3. Какой контур управления является более быстродействующим: управляющий суммарным потоком печи или каждый из контуров регулирования отклонения температуры потока от среднего значения?

4. Опишите структуру и основные компоненты схемы модели MCP.

5. Какие задачи ставятся при верификации программной модели MCP?

.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В учебном пособии рассмотрены вопросы разработки и исследования систем регулирования в составе АСУ ТП на примере проектирования ПТК САР машинного зала энергоблоков 1 и 2 Кольской АЭС. Подробно изложена технология многокритериальной оптимизации работы регуляторов уровня и давления по принятым критериям качества.

Для усвоения материала и подготовки к самостоятельным исследованиям студентам и аспирантам предложены задания по созданию Simulink-моделей контуров регулирования и их многокритериальной оптимизации на базе генетических алгоритмов в среде MATLAB. Даны рекомендации по исследованию объектов с использованием математического аппарата теории автоматического управления, анализу устойчивости контуров регулирования. Актуальность изложенного материала определяется влиянием систем управления на обеспечение надежности и безопасности технических объектов.

Представлена методология управления технологическими объектами предприятия нефтепереработки с помощью многосвязной САР (на примере многопоточной печи), позволяющей осуществлять автоматическую стабилизацию выходных параметров объекта, тем самым обеспечивая снижение количества параметров, требующих постоянного контроля со стороны оператора установки. Изложены методы проектирования многосвязных систем автоматического регулирования. Представленный материал демонстрирует студентам основное преимущество супervизорного управления, состоящее в возможности непрерывного контроля и управления процессом в режиме, близком к оптимальному, что обеспечивает повышение эффективности работы объектов автоматизации.

Для закрепления знаний студентам предлагается воспользоваться библиографическим списком, который позволит осуществить более глубокое изучение отдельных тем и вопросов.

Учебное пособие также может быть полезно для специалистов в области проектирования ПТК систем управления, использующих методы исследования, базирующиеся на современных информационных технологиях. Общность принципов управления технологическими объектами позволяет рекомендовать изложенные в пособии подходы при проектировании и моделировании систем управления различной сложности и назначения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисова, Л. А. Системы регулирования объектов теплоэнергетики: разработка и многокритериальная оптимизация с использованием генетических алгоритмов / Л. А. Денисова, В. А. Мещеряков // Автоматизация в промышленности. – 2017. – № 9. – С. 23–30.
2. Раскин, Е. М. Программно-технический комплекс для регулирования давления в главном паровом коллекторе энергоблока АЭС / Е. М. Раскин, Л. А. Денисова // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 2. – С. 35–39.
3. Раскин, Е. М. Инструментальный комплекс проектирования систем управления ЯЭУ на базе средств СПА-ПС / Е. М. Раскин, Л. А. Денисова, М. И. Федосеев // Математические модели для исследования и обоснования характеристик оборудования и ЯЭУ в целом при их создании и эксплуатации : тез. докл. семинара НТС Минатома России «Динамика, тепло-гидравлика и безопасность реакторов и АЭС» (Сосновый Бор, 18–22 сент. 2000 г.). – Гатчина : Изд-во НИТИ, 2000. – С. 175–177.
4. Денисова, Л. А. Оптимизация в автоматизированных системах управления : учеб. пособие / Л. А. Денисова ; Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2008. – 50 с.
5. Денисова, Л. А. Инструментальный комплекс проектирования систем управления на базе средств СПА-ПС / Л. А. Денисова, Е. М. Раскин, М. И. Федосеев // Микропроцессорные системы автоматики : материалы III Междунар. науч.-техн. конф. (Новосибирск, 19–24 февр. 1996 г.) / Новосиб. гос. техн. ун-т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 1996. – С. 24–25.
6. Нариц, А. Д. Особенности отработки программно-технических комплексов на базе программно-технических средств ТПТС51 / А. Д. Нариц, С. И. Купцов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерное приборостроение. – Москва : Изд-во ВНИИА, 1999. – Вып. 2. – С. 32–35.
7. Пащенко, Ф. Ф. Основы моделирования энергетических объектов / Ф. Ф. Пащенко, Г. А. Пикина. – Москва : Физматлит, 2011. – 464 с. – ISBN 978-5-9221-1367-0.
8. Денисова, Л. А. Многокритериальная оптимизация на основе генетических алгоритмов при синтезе систем управления : моногр. / Л. А. Де-

нисова ; Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2014. – 170 с. – ISBN 978-5-8149-1822-2.

9. Острайковский, В. А. Автоматизированные системы управления АЭС : учеб. пособие / В. А. Острайковский ; Обнин. ин-т атомной энергетики. – Обнинск : Изд-во ОИАЭ, 1987. – 86 с.

10. Северин, В. П. Методы анализа и синтеза систем автоматического управления энергоблоков атомных электростанций / В. П. Северин // Проблемы обеспечения безопасности информационных и управляющих систем АЭС : сб. науч. тр. / под ред. М. А. Ястребенецкого. – Одесса : Астрапринт, 2010. – С. 137–152.

11. Раскин, Е. М. Программно-технический комплекс для регулирования питания парогенераторов энергоблока АЭС / Е. М. Раскин, Л. А. Денисова, П. Н. Надточий // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 11. – С. 37–41.

12. Ротач, В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В. Я. Ротач. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 296 с.

13. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А. А. Красовского. – Москва : Наука, 1987. – 712 с.

14. Первозванский, А. А. Курс теории автоматического управления : учеб. пособие. / А. А. Первозванский. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2010. – 615 с. – ISBN 978-5-8114-0995-2.

15. Методы классической и современной теории автоматического управления : учеб. В 5 т. Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления / под ред. К. А. Пупкова, Н. Д. Егупова ; Москов. гос. техн. ун-т им. Н. Э. Баумана. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. – 616 с. – ISBN 5-7038-2194-0.

16. Теория автоматического управления (дополнительные главы) : учеб. пособие / под. ред. Д. А. Новикова. – Москва : Ленанд, 2019 . – 552 с. – ISBN 978-5-9710-6644-6.

17. Трофимов, А. И. Принципы построения автоматических регуляторов теплоэнергетических процессов АЭС : учеб. пособие / А. И. Трофимов, Н. Д. Егупов, Я. В. Слекеничс. – Москва : Энергоатомиздат, 1999. – 337 с. – ISBN 5-283-03189-6.

18. Дорф, Р. Современные системы управления / Р. Дорф ; пер. с англ. Б. И. Копылова. – Москва : Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с. – ISBN 5-93208-119-8.
19. Иванов, В. А. Регулирование энергоблоков / В. А. Иванов. – Ленинград : Машиностроение, 1982. – 311 с.
20. Денисова, Л. А. Проектирование систем управления на основе многокритериальной оптимизации с использованием генетических алгоритмов / Л. А. Денисова, В. А. Мещеряков // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 10. – С. 18–24.
21. Денисова, Л. А. Реализация системы регулирования с нечеткой компенсацией статической ошибки в среде автоматизированного проектирования Террол / Л. А. Денисова, П. Н. Надточий, Е. М. Раскин // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 8. – С. 33–38.
22. Денисова, Л. А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования на основе многокритериальной оптимизации с использованием генетического алгоритма / Л. А. Денисова // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 12. – С. 7–14.
23. Денисова, Л. А. Разработка супервизорной системы автоматического управления на основе нечеткого логического вывода / Л. А. Денисова, Д. М. Алексеев // Автоматизация в промышленности. – 2019. – № 1. – С. 46–52.
24. Бесекерский, В. А. Системы автоматического управления с микроЭВМ / В. А. Бесекерский, В. В. Изранцев. – Москва : Наука, 1987. – 320 с.
25. Гудвин, Г. К. Проектирование систем управления / Г. К. Гудвин, С. Ф. Гребе, М. Э. Сальгадо ; пер. с англ. А. М. Епанешникова. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. – 911 с. – ISBN 5-94774-128-8.
26. Изерман, Р. Цифровые системы управления / Р. Изерман ; пер. с англ. С. П. Забродина. – Москва : Мир, 1984. – 541 с.
27. Подиновский, В. В. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач : моногр. / В. В. Подиновский, В. Д. Ногин. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Физматлит, 2007. – 255 с. – ISBN 978-5-9221-0812-6.
28. Холланд, Дж. Генетические алгоритмы / Дж. Холланд // В мире науки. – 1992. – № 9. – С. 32–40.

29. Denisova, L. Synthesis of a Control System Using the Genetic Algorithms / L. Denisova, V. Meshcheryakov. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.567 // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – Vol. 49, no. 12. – P. 156–161.
30. Deb, K. Multi-Objective Optimization Using Evolutionary Algorithms / K. Deb. – Chichester, UK : John Wiley & Sons, 2001. – 518 p.
31. Денисова, Л. А. Исследование автоматизированных систем средствами MATLAB и в среде технологического программирования TEPROL : учеб. пособие / Л. А. Денисова, П. Н. Надточий ; Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2023. – 146 с. – ISBN 978-5-8149-3606-6.
32. Денисова, Л. А. Автоматизация параметрического синтеза системы регулирования с использованием генетического алгоритма / Л. А. Денисова, В. А. Мещеряков // Автоматизация в промышленности. – 2012. – № 7. – С. 34–38.
33. Черных, И. В. Simulink: среда создания инженерных приложений / И. В. Черных ; под общ. ред. В. Г. Потемкина. – Москва : Диалог-МИФИ, 2004. – 491 с. – ISBN 5-86404-186-6.
34. Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5 SP1/7 + Simulink 5/6 в математике и моделировании / В. П. Дьяконов. – Москва : Солон-Пресс, 2005. – 581 с. – ISBN 5-98003-209-6.
35. Дьяконов, В. П. MATLAB 7.*/R2006/R2007 : самоучитель / В. П. Дьяконов. – Москва : ДМК Пресс, 2008. – 768 с. – ISBN 978-5-94074-424-5.
36. Денисова, Л. А. Исследование систем автоматического управления в среде MATLAB/Simulink : учеб. пособие / Л. А. Денисова, М. П. Маркова ; Ом. гос. техн. ун-т. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2021. – 1 CD-ROM (1,62 Мб). – ISBN 978-5-8149-3218-1.
37. Global Optimization Toolbox. – URL: <https://www.mathworks.com/products/global-optimization.html> (дата обращения: 12.04.2023).
38. Математическая модель системы питания парогенератора энергоблока АЭС / Е. М. Раскин, Л. А. Денисова, В. П. Синицын, Ю. В. Нестеров // Автоматизация в промышленности. – 2010. – № 7. – С. 3–7.

ПРИЛОЖЕНИЕ

НЕКОТОРЫЕ ФУНКЦИИ MATLAB

Перечень функций, применяемых для построения графиков (для визуализации результатов расчетов переходных процессов систем управления), приведен в табл. П.1.

Таблица П.1

Функции для построения графиков

Функция MATLAB	Назначение функции
figure	Создание нового графического окна
subplot(n,m,p);	Деление графического окна на части с указанием количества частей: n – по вертикали, m – по горизонтали; p – номер подокна, в котором строится график
plot(x,y);	Построение графика в линейном масштабе по обеим осям
axis([xmin xmax ymin ymax]);	Установление жестких границ поля графика в единицах величин, откладываемых по осям
xlabel('x')	Вывод пояснения к графику вдоль горизонтальной оси
ylabel('y');	Вывод пояснения к графику вдоль вертикальной оси
title(['<текст>'])	Вывод заголовка графика
text(x,y,['<текст>']))	Размещение текста в поле графика, при этом начало текста помещается в точке с координатами x, y
hold on	Включение режима сохранения графического окна, установленного предыдущей командой (для построения следующего графика в том же окне)
grid on	Вывод координатной сетки графика
set(<имя графика>,'LineWidth',n)	Изменение свойств линии (толщина линии n)

Перечень функций, применяемых для построения математических моделей и анализа систем управления, приведен в табл. П.2.

Таблица П.2
Функции для построения и анализа моделей САУ

Функция MATLAB	Назначение функции
<code>tf(num,den)</code>	Определение передаточной функции по полиномам числителя (<code>num</code>) и знаменателя (<code>den</code>)
<code>series(sys1,sys2)</code>	Определение передаточной функции двух последовательно соединенных блоков, описываемых переменными <code>sys1</code> и <code>sys2</code>
<code>feedback(sys0,sys2)</code>	Определение передаточной функции системы с обратной связью: передаточная функция объекта – <code>sys0</code> , передаточная функция блока в цепи обратной связи – <code>sys2</code>
<code>c2d(sys1,to,'zoh')</code>	Преобразование непрерывной системы с передаточной функцией <code>sys1</code> в дискретную систему (с периодом дискретизации <code>t0</code>). Параметр ' <code>zoh</code> ' соответствует применению экстраполятора нулевого порядка
<code>pole(sys1)</code>	Вычисление полюсов передаточной функции <code>sys1</code>
<code>nyquist(sys1,sys2,{Wmin,Wmax})</code>	Построение на комплексной плоскости графика АФХ (годографа Найквиста) для систем <code>sys1</code> , <code>sys2</code> в диапазоне частот от <code>Wmin</code> до <code>Wmax</code>
<code>bode(sys1,sys2,{Wmin,Wmax})</code>	Построение частотных характеристик АЧХ и ФЧХ (диаграммы Боде) для систем <code>sys1</code> , <code>sys2</code> в диапазоне частот от <code>Wmin</code> до <code>Wmax</code>
<code>margin(sys1)</code>	Определение запасов устойчивости по амплитуде и фазе системы с передаточной функцией <code>sys1</code>

Перечень функций, применяемых для выполнения моделирования и оптимизации САУ, приведен в табл. П.3.

Таблица П.3

Функции для моделирования и оптимизации САУ

Функция MATLAB	Назначение функции
clc	Очищение командного окна
clear all	Удаление из памяти компьютера всех ранее определенных переменных
rng shuffle	Управление генерацией случайных чисел с «перемешиванием» обеспечивает разные значения начального числа
open_system('<имя Simulink-модели>')	Загрузка в рабочую область Simulink-модели
set_param('<имя Simulink-модели/имя блока>', '<тип параметра>', '<имя параметра>')	Установка параметров блоков модели
save('<имя Simulink-модели>')	Сохранение в памяти и рабочей области Simulink-модели
sim('<имя Simulink-модели>')	Запуск на выполнение Simulink-модели
length(Z)	Определение длины вектора Z
min(Z)	Извлечение минимального элемента вектора Z
[x,fval,exitflag,output] = gamultiobj(<имя функции пригодности>, n)	Выполнение многоцелевой оптимизации с использованием ГА (n – количество переменных): определение множества Парето-решений x. Возвращает: матрицу fval – значения критериев (в соответствии со структурой функции пригодности) для всех решений x; exitflag – признак причины остановки алгоритма; output – данные о процессе оптимизации

Перечень параметров функции `gamultiobj`, применяемой для выполнения много-критериальной оптимизации САУ, приведен в табл. П.4.

Таблица П.4

Параметры функции `gamultiobj` многоцелевого ГА

Параметр	Назначение	Значение по умолчанию
<code>CreationFcn</code>	Задает функцию, создающую начальную популяцию: <code>@gacreationuniform</code> , <code>@gacreationlinearfeasible</code>	<code>@gacreationuniform</code>
<code>CrossoverFcn</code>	Задает функцию кроссовера: <code>@crossoverheuristic</code> , <code>@crossoverscattered</code> , <code>@crossoverintermediate</code> , <code>@crossoversinglepoint</code>	<code>@crossoverscattered</code>
<code>CrossoverFraction</code>	Доля популяции следующего поколения (не включая элитных особей), создаваемая кроссовером	0.8
<code>Display</code>	Уровень отображения (вывода): 'off', 'iter', 'diagnose', 'final'	'final'
<code>FitnessLimit</code>	Значение функции пригодности, при достижении которого останавливается алгоритм	-Inf
<code>ParetoFraction</code>	Задает долю особей, удерживаемых на первом фронте Парето, в то время как решатель выбирает особи из более высоких фронтов (параметр является скалярным между 0 и 1)	0.35
<code>PopulationSize</code>	Размер популяции, целое число или вектор	20
<code>PopInitRange</code>	Матрица или вектор диапазона особей в начальной популяции (использован набор нижних и верхних границ [lb; ub] для проектных переменных x)	[0;1]
<code>StallGenLimit</code>	Число последовательных поколений, не дающее улучшение функции пригодности, после которого останавливается алгоритм	50

Окончание табл. П.4

Параметр	Назначение	Значение по умолчанию
StallTimeLimit	Время, за которое, если нет улучшения функции пригодности, алгоритм останавливается, с	Inf
TimeLimit	Максимально допустимое время работы, с	Inf
TolFun	Если изменение функции пригодности за StallGenLimit поколений меньше этой величины, алгоритм останавливается	1e-6
PlotFcns	Задает функции графики: @gaplotpareto, @gaplotrankhist, @gaplotdistance, @gaplotscorediversity, @gaplotbestf, @gaplotbestindiv	[]

Учебное издание

Денисова Людмила Альбертовна

**РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
В СРЕДЕ MATLAB**

Учебное пособие

Редактор *T. A. Москвитина*
Компьютерная верстка *E. B. Макарениной*

Для дизайна обложки использованы материалы
из открытых интернет-источников

Сводный темплан 2023 г.
Подписано в печать 28.04.23. Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.
Отпечатано на дупликаторе. Усл. печ. л. 7,5. Уч.-изд. л. 7,5.
Тираж 300 экз. (1-й з-д 1–30). Заказ 216.

Издательство ОмГТУ. 644050, г. Омск, пр. Мира, 11; т. 23-02-12.
Типография ОмГТУ.