

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)

В.И. САНЧУГОВ, Е.В.ШАХМАТОВ

АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ С ГАЗОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебника для студентов, обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки: 13.03.03 Энергетическое машиностроение; 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств; 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств; 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов; 25.03.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей

САМАРА
Издательство Самарского университета
2017

УДК 681.5(075)+621.431.75(075)

ББК 32.965я7

С 188

Рецензенты: канд. техн. наук, доц. Д.Г. Федорченко,
канд. техн. наук А.В. Черников

Санчугов, Валерий Иванович

С188 Автоматика и управление энергетическими установками с газотурбинным приводом: учебник / В.И.Санчугов, Е.В. Шахматов. – Самара: Изд-во Самарского университета, 2017. – 260 с.

ISBN 978-5-7883-1163-0

Рассмотрены основы теории систем автоматического управления (САУ) машинами с механизмами. Описаны принципы и законы построения САУ, характеристики типовых элементов и динамические характеристики двигателей и систем управления газотурбинными двигателями, рассмотрены вопросы устойчивости движения машин и механизмов. Изложены особенности работы систем автоматического управления двигателями и нагнетателями газоперекачивающих агрегатов компрессорных станций магистральных газопроводов.

Для закрепления теоретического материала в учебнике представлен комплекс лабораторно-практических занятий, основанный на использовании ПО Matlab с приложением Simulink версией не ниже Matlab R2012.

Учебник предназначен для подготовки студентов, обучающихся по направлениям подготовки:

- 13.03.03 Энергетическое машиностроение;
- 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств;
- 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств;
- 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов;
- 25.03.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей.

УДК 681.5(075)+621.431.75(075)

ББК 32.965я7

ISBN 978-5-7883-1163-0

© Самарский университет, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	6
Часть 1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАШИНАМИ И МЕХАНИЗМАМИ	8
1 Основы понятия.....	8
1.1 Принципы построения и основные элементы систем автоматического управления (САУ).....	8
1.2 Математическое описание систем и структурные схемы систем автоматического управления	11
1.3 Основные законы управления	13
1.4 Представление объектов управления и регуляторов в виде совокупности типовых звеньев	16
1.5 Основные сведения о программе Matlab и приложении Simulink.....	18
2 Типовые звенья САУ	29
2.1 Основные понятия. Виды и уравнения типовых звеньев.	29
2.2 Переходные характеристики типовых звеньев.....	38
2.3 Частотные характеристики типовых звеньев.....	45
2.4 Выполнение лабораторных работ по исследованию характеристик типовых динамических звеньев.....	53
3 Свойства ГТД как объектов управления по частоте вращения и температуре газов перед турбиной.....	57
3.1 Газотурбинный двигатель как объект управления по частоте вращения	57
3.1.1 Влияние размеров двигателя	62
3.1.2 Влияние режимов работы двигателя.....	62
3.1.3 Влияние внешних условий	64
3.2 Динамические свойства ТРД как объекта управления по температуре газов T_r^*	65
3.3 Выполнение лабораторных исследований по оценке динамических характеристик ГТД	70
4 Принципы действия и структурные схемы гидромеханических систем управления частоты вращения ГТД.....	75
4.1 САУ с регулятором прямого действия	75
4.2 САУ с регулятором непрямого действия	78

4.3 САУ с регулятором с жесткой обратной связью	80
4.4 САУ с регулятором с гибкой обратной связью.....	83
4.5 Практическая часть выполнения исследований.....	85
5 Системы автоматического управления двигателями	
с электронными регуляторами	88
5.1 Структурное построение систем электронного управления	89
5.2 Основные законы управления	93
5.3 Модель электронного ПИД-регулятора.....	98
5.4 Порядок выполнения лабораторной работы	99
5.5 Содержание отчета о результатах лабораторной работы.....	100
6 Устойчивость движения механических устройств и систем	
автоматического управления.....	101
6.1 Понятие об устойчивости движения	101
6.2 Условия устойчивости движения	102
6.3 Признаки и критерии устойчивости движения	106
6.4 Алгебраический критерий устойчивости	
(критерий Рауса-Гурвица)	106
6.5 Критерий устойчивости Михайлова	107
6.6 Частотный критерий устойчивости Найквиста.....	111
6.7 Качество процессов управления.....	115
6.7.1 Критерии и способы оценки качества.....	115
6.7.2 Качество переходных процессов в САУ. Показатели	
качества переходных процессов	116
6.7.3 Определение параметров САУ по распределению	
корней характеристического уравнения	119
6.7.4 Оценка качества переходного процесса	
по амплитудно-частотным характеристикам.....	122
6.7.5 Интегральные оценки качества переходного процесса	123
6.8 Лабораторные исследования устойчивости движения	
и качества процессов управления.....	128
Часть 2 ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИМИ	
АГРЕГАТАМИ (ГПА) МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ... 133	
7 Системы автоматического управления двигателем ГПА	133
7.1 Описание топливного регулятора	135
7.2 Работа регулятора	137
7.3 Методика определения коэффициентов регуляторов.....	142
7.4 Взаимодействие с логической программой.....	146
8 Системы управления центробежным нагнетателем газа	153
8.1 Теоретические основы и алгоритм работы	
антипомпажного регулятора.....	153

8.2 Управление регулятором	164
8.3 Помпажный тест.....	167
9 Система комплексного управления ГПА.....	172
9.1 Технические характеристики	173
9.2 Состав, устройство и работа системы	179
9.3 Порядок расчета вычисляемых параметров.....	183
9.4 Использование системы.....	190
9.5 Организация человеко-машинного интерфейса системы.....	197
Список использованных источников.....	236
<i>Приложение А.</i> Агрегатный состав и работа систем топливопитания и автоматики авиационных ГТД.....	238
<i>Приложение Б.</i> Расшифровка кодов аналоговых расчетных параметров «Метка контура регулятора» и «Состояние регулятора».....	245
<i>Приложение В.</i> Перечень сообщений, передаваемых в ПК «Аргус» от регулятора	246
<i>Приложение Г.</i> Параметры работы ГПА, контролируемые системой автоматического управления	248

ВВЕДЕНИЕ

Во все времена человек совершенствовал орудия труда, стремясь облегчить физические затраты и повысить производительность своей деятельности. Развитие уровня техники и технологий непрерывно сопровождалось усложнением и увеличением числа решаемых человеком задач и требований точности их выполнения, увеличением затрат энергии. Управлять техникой становилось все сложнее (а порой и просто невозможно), поэтому стали появляться различные автоматические системы, облегчающие труд человека.

До середины XX столетия для управления техническими системами повсеместно использовались гидромеханические системы. Такие системы использовали аналоговую измерительную информацию в виде сигналов по перемещению, углу поворота, частоте вращения, поступающую от датчиков – преобразователей информации. Для получения управляющих сигналов использовались различные типы гидропневмопреобразователей информации с анероидными коробками и мембранами, с пружинами, многочисленными дросселями, поворотными заслонками, клапанами, золотниковыми распределителями. Источниками энергии в таких системах являлись жидкости и газы с различными давлениями. Такие системы становились все более громоздкими и менее надежными (приложение А).

Так, гидромеханическая система топливопитания и управления газотурбинного авиационного двигателя середины прошлого столетия включала в себя несколько десятков золотниковых и клапанных элементов, различных гидро- и пневмоцилиндров и решающих элементов, выполняющих задачи управления двигателями по двадцати, тридцати параметрам. Масса таких систем достигала сотни килограммов.

При этом результаты исследований крупных отечественных и зарубежных ученых позволили создать теорию систем автоматического управления (САУ) сложными техническими устройствами в различных отраслях человеческой деятельности:

- в авиации и космонавтике;
- в атомной промышленности и энергетике;
- на транспорте и других отраслях.

Но, в отличие от других наук, которые определяли параметры рабочих процессов, создавали методы расчета и проектирования, обеспечивали прочность и надежность машин и механизмов, теория автоматического управления направлена на создание методов и средств управления машинами и механизмами. Эти методы направлены на достижение наилучших параметров работы, безопасности, эффективности и долговечности их функционирования. В процессе создания теории систем автоматического управления были разработаны методы аналитического описания таких систем, анализа и синтеза систем с заданными свойствами и параметрами.

Однако уровень сложности техники непрерывно повышается. Появились трехвальные газотурбинные двигатели на газообразном топливе и т.д. В этих условиях сложность САУ продолжает расти, а их надежность снижается.

Появление микропроцессорной вычислительной техники произвело эволюционный переворот в развитии и использовании систем автоматического управления, в решении технических и технологических задач машиностроения и эксплуатации сложных технических систем. Это объясняется, с одной стороны, несравненной простотой реализации законов управления методами вычислительной техники и, с другой стороны, возможностью создания автоматических систем управления, выполняющих свои функции без участия человека-оператора.

Настоящий учебник предназначен для изучения основ теории автоматического управления и автоматики авиационных газотурбинных двигателей студентами, обучающимися по направлениям подготовки:

- 13.03.03 Энергетическое машиностроение;
- 15.03.04 Автоматизация технологических процессов и производств;
- 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств;
- 24.03.05 Двигатели летательных аппаратов;
- 25.03.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов и двигателей.

Часть 1

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МАШИНАМИ И МЕХАНИЗМАМИ

1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Автоматическое управление – это процесс поддержания или изменения режима работы машин и механизмов, происходящий без участия человека. При этом под системой автоматического управления (САУ) понимается совокупность машины или механизма (объекта управления) и управляющего устройства – регулятора.

Теоретические основы САУ базируются на следующих методах [1, 2, 3, 4]:

- математического описании динамических свойств объектов управления и регуляторов;
- представления объектов управления и регуляторов в виде простейших элементов, называемых *типовыми звеньями*;
- составления структурных схем САУ любой сложности в виде соединения типовых звеньев.

1.1 Принципы построения и основные элементы систем автоматического управления (САУ)

Любая система автоматического управления рассматривается как совокупность объекта управления и регулятора (рис. 1.1).

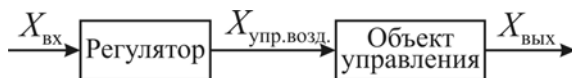


Рис. 1.1. Структурная схема САУ

На вход в регулятор подается сигнал $X_{вх}$, определяющий заданный режим работы объекта управления. Обработав поступающую информацию с учетом характеристик объекта управления, регулятор вырабатывает сигнал $X_{упр.возд}$ (управляющее воздействие), который поступает в объект управления и обеспечивает заданное значение режима работы объекта, характеризуемое величиной выходного сигнала $X_{вых}$.

Например, при управлении частотой вращения ротора газотурбинного двигателя летчик задает частоту вращения ротора $n_{зад}(X_{вх})$. Регулятор частоты вращения определяет соответствующее этой частоте значение расхода топлива, поступающее в двигатель $G_{топл}(X_{упр.возд})$. При этом ротор двигателя должен развивать заданное значение частоты вращения $n_{зад}(X_{вых})$.

В самом общем виде САУ состоит из объекта управления и регулятора. Назначение регулятора состоит и заключается в выработке управляющего воздействия на объект управления, обеспечивающего заданный режим его работы. При этом выделяют два принципа построения САУ:

- управление по компенсации отклонения режима работы объекта управления от заданного значения;
- управление по компенсации изменения внешних возмущений, действующих на объект управления.

При компенсации отклонения режима работы объекта управления (рис. 1.2,а) регулятор измеряет фактический режим работы объекта по величине управляемого выходного сигнала. Сравнивая величину этого сигнала с заданным значением, регулятор вырабатывает необходимое управляющее воздействие на объект управления для поддержания заданного режима его работы. Канал передачи сигнала с выхода объекта управления на вход регулятора называется **обратной связью**, а САУ, работающая по данному принципу, называется **замкнутой**.

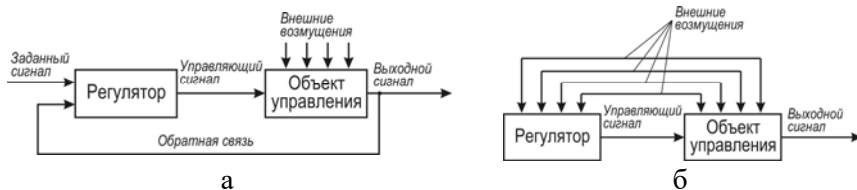


Рис. 1.2. Принципиальная схема систем автоматического регулирования

При управлении по компенсации отклонения внешних возмущений (рис. 1.2,б) регулятор не измеряет фактическое значение выходного сигнала объекта управления, а косвенно судит о нем по изменению величины внешних возмущений. Измеряя эти возмущения, под действием которых нарушается заданный режим работы объекта, регулятор вырабатывает управляющий сигнал, направленный на сохранение режима работы объекта. Такие системы регулирования называются разомкнутыми.

Основными элементами САУ (рис. 1.3) являются:

- задающее устройство, вырабатывающее сигнал $X_{\text{зад}}$ по команде человека или по специальной программе о заданном режиме работы ГТД;
- элемент сравнения, вырабатывающий сигнал рассогласования между заданным и фактическим режимом работы с учетом сигнала по внутренней обратной связи;
- усилительное и исполнительное устройства, вырабатывающие воздействие на изменение режима работы объекта;
- устройство обратной связи, дающее информацию в регулятор о режиме работы объекта;
- устройство внутренней обратной связи, входящее в состав регулятора и дающее информацию об управляющих командах регулятора ($X_i = X_{\text{зад}} - X_{\text{о.с.}} - X_{\text{вн.о.с.}}$).



Рис. 1.3. Структурный состав системы автоматического регулирования

1.2 Математическое описание систем и структурные схемы систем автоматического управления

Математическое описание объектов управления и регуляторов необходимо для выбора принципиальных схем расчета и проектирования конструкций САУ. Уравнения, описывающие работу элементов и систем в целом, записываются на основе физических законов, определяющих их работу. При этом используются законы механики, электротехники, гидравлики и других наук, определяющих работу конкретных САУ. Уравнения динамики для непрерывных систем обычно представляются в виде линейных дифференциальных или алгебраических уравнений.

Полная форма уравнений может иметь вид:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n X_{\text{ВЫХ}}}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} X_{\text{ВЫХ}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dt} + \alpha X_{\text{ВЫХ}} = \\ = B_m \frac{d^m X_{\text{ВХ}}}{dt^m} + B_{m-1} \frac{d^{m-1} X_{\text{ВХ}}}{dt^{m-1}} + \dots + B_1 \frac{dX_{\text{ВХ}}}{dt} + B_0 X_{\text{ВХ}}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $X_{\text{ВЫХ}}$ – выходной сигнал САУ или элемента;

$X_{\text{ВХ}}$ – управляющие сигналы или внешние возмущения, действующие на систему;

$a_n \dots a; B_m \dots B_0$ – коэффициенты.

Левая часть уравнения (1.1) – полином n -го порядка, описывает движение объекта управления регулятора или всей системы управления в целом. Это движение происходит под действием собственных внутренних свойств (структуры, состава, конструкции) объекта, регулятора или системы в целом.

Правая часть уравнения описывает управляющие сигналы или внешние возмущения, действующие на систему.

Уравнение (1.1) может быть записано в виде

$$D(t)X_{\text{ВЫХ}} = B(t)X_{\text{ВХ}}, \quad (1.2)$$

где $D(t)$ – собственный оператор устройства или системы, определяемый собственными свойствами;

$B(t)$ – оператор входных сигналов или внешних возмущений, действующих на систему.

В соответствии со структурной схемой САУ, представленной на рис. 1.1, математическое описание регулятора определяется уравнением

$$D(t)X_{\text{упр.возд}} = B(t)X_{\text{вх}}, \quad (1.3)$$

а описание объекта управления уравнением

$$D(t)X_{\text{вых}} = B(t)X_{\text{упр.возд}}. \quad (1.4)$$

С целью упрощения методов расчетов уравнения динамики объектов управления и регуляторов записывают не через оригиналы функций, как это сделано в уравнениях (1.1)–(1.4), а в виде изображений функций, получаемых с помощью прямого преобразования Лапласа.

Если оригинал $X(t)$ представляет собой функцию времени t , то изображение этой функции $X(s)$ есть функция комплексной переменной s и задается с помощью интеграла вида:

$$\tilde{X}(s) = \int_0^{\infty} X(t)l^{-st} dt.$$

Простейшие операции над оригиналами и изображениями представлены в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Тип операции	Оригинал	Изображение
Линейное преобразование	$aX_1(t) + bX_2(t)$	$a\tilde{X}_1(s) + b\tilde{X}_2(s)$
Дифференцирование при нулевых начальных условиях	$\frac{dx}{dt}$	$s\tilde{X}(s)$
	$\frac{d^n x}{dt^n}$	$s^n \tilde{X}(s)$
Интегрирование	$\int_0^{\infty} X(t)dt$	$\frac{\tilde{X}(s)}{s}$

В теории систем автоматического управления пользуются не уравнениями регуляторов и объектов управления, записанными не через изображения, а их передаточными функциями.

Под **передаточной функцией** понимают отношение изображений выходной величины регулятора или объекта к изображению

функций входной величины, полученных при нулевых начальных условиях.

Программное обеспечение Matlab-Simulink, широко используемое при моделировании САУ, полностью базируется на понятии передаточных функций.

1.3 Основные законы управления

Эти законы, определяющие работу регуляторов, связывают входные сигналы $X_{\text{вх}}$, поступающие на вход в регулятор, и управляющие воздействия $X_{\text{ув}}$, вырабатываемые регулятором [5].

При этом отклонения управляющих воздействий ($X_{\text{ув}}$) и входной величины записывают в относительных координатах по отношению к каким-то базовым значениям x_0 и $x_{\text{зад},0}$:

$$\delta x_{\text{ув}} = \frac{x_{\text{ув}} - x_0}{x_0}; \quad \delta x_{\text{вх}} = \frac{x_{\text{вх}} - x_{\text{зад},0}}{x_{\text{зад},0}}.$$

Пропорциональный закон. Этот простейший закон (известный еще с позапрошлого столетия) записывается в виде

$$\delta x_{\text{ув}} = k_p \delta x_{\text{вх}}, \quad (1.5)$$

где k_p – коэффициент усиления регулятора.

В данном случае передаточная функция $W(s)$ записывается в виде

$$W(s) = \frac{\tilde{\delta} x_{\text{ув}}}{\tilde{\delta} x_{\text{вх}}} = k_p. \quad (1.6)$$

Регуляторы, осуществляющие этот закон, называются пропорциональными регуляторами (П-регуляторами).

Работу регулятора, как это следует из формул (1.1) и (1.2), определяет коэффициент k_p , который отражает свойства конструкции регулятора и носит название коэффициента усиления (или передачи).

Интегральный закон (И-регулятор) Аналитически интегральный закон записывается в виде

$$\delta x_{\text{ув}} = \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t \delta x_{\text{вх}} dt. \quad (1.7)$$

Коэффициент $T_{\text{И}}$ имеет размерность времени и называется постоянной времени интегрирования. Передаточная функция И-регулятора имеет выражение:

$$W_{\text{И}}(s) = \frac{1}{T_{\text{И}}s}, \quad (1.8)$$

где s – оператор дифференцирования (d/dt).

В отличие от пропорционального закона интегральный регулятор вырабатывает управляющее воздействие с учетом продолжительности отклонения управляемой величины от заданного значения.

Пропорционально-интегральный закон (ПИ-регулятор). Имеет связь входного сигнала (управляющего воздействия) с отклонением управляемой величины от заданного значения на выходе:

$$\delta x_{\text{ув}} = k_{\text{р}} \left(\delta x_{\text{вх}} + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t \delta x_{\text{вх}} dt \right), \quad (1.9)$$

где $T_{\text{И}}$ – постоянная времени интегрирования.

Передаточная функция, отражающая работу ПИ-регулятора, записывается в виде

$$W_{\text{ПИ}}(s) = k_{\text{р}} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{И}}s} \right). \quad (1.10)$$

Выражения (1.9) и (1.10) показывают, что управляющее воздействие ПИ-регулятора вырабатывается с учетом величины и продолжительности отклонения управляемой величины.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-регулятор) имеет выражение:

$$\delta x_{\text{ув}} = k_{\text{р}} \left(\delta x_{\text{вх}} + \frac{1}{T_{\text{И}}} \int_0^t \delta x_{\text{вх}} dt + K_{\text{д}} \frac{d\delta x_{\text{вх}}}{dt} \frac{1}{T_{\text{д}} \frac{d\delta x_{\text{вх}}}{dt} + 1} \right). \quad (1.11)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_{\text{ПИД}}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{K_D s}{T_D s + 1} \right), \quad (1.12)$$

где T_D – постоянная дифференцирования. Принято считать, что ПИД-регулятор дает наилучшее качество регулирования, поскольку управляющий сигнал вырабатывается не только с учетом величины и длительности отклонения регулируемого параметра, но и с учетом скорости его изменения. При соответствующей настройке коэффициентов k_p , T_I и T_D можно обеспечить наилучшее качество переходных процессов управления объектом практически любой сложности.

Некоторой разновидностью ПИД-регулирования является *пропорционально-дифференциально-дифференциальный* закон (ПДД – регулятор).

Работа ПДД- регулятора описывается выражением

$$\delta x_{\text{ув}} = k_p \left(\delta x_{\text{вх}} + T_D \frac{d x_{\text{вх}}}{dt} + T_D'' \frac{d^2 x_{\text{вх}}}{dt^2} \right) \quad (1.13)$$

или передаточной функцией

$$W_{\text{ПДД}}(s) = k_p (1 + T_D s + T_D'' s^2). \quad (1.14)$$

Такой регулятор позволяет учесть не только скорость отклонения регулируемого параметра, но и ускорение его отклонения.

Настроечными коэффициентами регулятора, определяющими параметры переходного процесса, являются k_p , T_D и T_D'' .

Зона нечувствительности

Для улучшения (стабильности) работы регулятора при небольшом значении рассогласования $\delta x_{\text{вх}} = x_{\text{зад}} - \delta x_{\text{вых}}$ в формулах (1.8), (1.10) вместо $\delta x_{\text{вых}}$ используется уточненное значение $\delta x_{\text{вх}}^*$, определяемое с использованием зоны нечувствительности регулятора следующим образом:

$$\delta x_{\text{вх}}^* = \begin{cases} 0, & \text{если } |\delta x_{\text{вх}}| \leq x_p, \\ \delta x_{\text{вх}} - x_p/2, & \text{если } \delta x_{\text{вх}} > x_p/2, \\ \delta x_{\text{вх}} + x_p/2, & \text{если } \delta x_{\text{вх}} < -x_p/2, \end{cases} \quad (1.15)$$

где x_p – ширина зоны нечувствительности.

При нахождении управляемого параметра в диапазоне $|\delta x_{\text{вх}}| \leq \leq x_p/2$ управляющее воздействие определяется только интегральной составляющей.

Ограничение величины управляющего воздействия

Ограничение пределов изменения управляющего воздействия на минимальном и максимальном уровне позволяет ограничить функционирование объекта управления за пределами безопасной работы. При этом

$$\delta x_{\text{ув}} * = \begin{cases} \delta x_{\text{ув}}, & \text{если } \delta x_{\text{ув min}} \leq \delta x_{\text{ув}} \leq \delta x_{\text{ув max}}, \\ \delta x_{\text{ув min}}, & \text{если } \delta x_{\text{ув}} < \delta x_{\text{ув min}}, \\ \delta x_{\text{ув max}}, & \text{если } \delta x_{\text{ув}} > \delta x_{\text{ув max}}. \end{cases} \quad (1.16)$$

Величины $\delta x_{\text{ув min}}$ и $\delta x_{\text{ув max}}$ определяются для каждого объекта управления индивидуально.

1.4 Представление объектов управления и регуляторов в виде совокупности типовых звеньев

Типовое звено – это элемент, поведение которого независимо от его физической природы и конструкции (электрический, гидравлический, пневматический, механический и другой) описывается одинаковым уравнение связи выходного сигнала с входным. Соответственно и реакция звена на одинаковые входные возмущения одинакова и описывается одинаковыми уравнениями. При этом теория САУ рассматривает 6 видов типовых звеньев.

Основные свойства типовых звеньев:

- один входной и один выходной сигнал;
- сигнал распространяется только в одном направлении от входа к выходу;
- предполагается, что все звенья имеют линейные характеристики.

Схематичное изображение типового звена представлено на рис. 1.4.

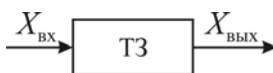


Рис. 1.4. Схематичное представление типового звена

Названия и основные уравнения типовых звеньев

1. *Пропорциональное (усиленное) звено:*

$$X_{\text{ВЫХ}} = KX_{\text{ВХ}}.$$

Передаточная функция пропорционального звена

$$W_{\text{пр}}^{(s)} = \frac{\tilde{X}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{X}_{\text{ВХ}}} = K,$$

где K – коэффициент усиления.

2. *Апериодическое звено:*

$$T \frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dt} + X_{\text{ВЫХ}} = KX_{\text{ВХ}},$$

где T – постоянная времени.

Передаточная функция аperiодического звена

$$W(s)_{\text{ап}} = \frac{\tilde{X}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{X}_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{Ts + 1}.$$

3. *Колебательное звено:*

$$T^2 \frac{d^2 X_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + 2T\xi \frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dt} + X_{\text{ВЫХ}} = KX_{\text{ВХ}},$$

где ξ – коэффициент демпфирования.

Передаточная функция колебательного звена

$$W(s)_{\text{кол}} = \frac{\tilde{X}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{X}_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{T^2 s^2 + T\xi s + 1}.$$

4. *Идеальное дифференцирующее звено:*

$$X_{\text{ВЫХ}} = K \frac{dX_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Передаточная функция идеального дифференцирующего звена

$$W_{\text{ид.дифф}}^{(s)} = \frac{\tilde{X}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{X}_{\text{ВХ}}} = Ks.$$

5. Реальное дифференцирующее звено:

$$T \frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dt} + X_{\text{ВЫХ}} = K \frac{dX_{\text{ВХ}}}{dt}.$$

Передаточная функция звена

$$W(s)_{\text{р.дифф.}} = \frac{Ks}{Ts + 1}.$$

6. Интегрирующее звено

$$\frac{dX_{\text{ВЫХ}}}{dt} = K_{\text{ВХ}} \cdot X_{\text{ВХ}}.$$

Передаточная функция звена

$$W(s)_{\text{инт}} = \frac{\tilde{X}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{X}_{\text{ВХ}}} = \frac{K}{s}.$$

1.5 Основные сведения о программе Matlab и приложении Simulink

Программа **MATLAB** представляет собой высокоуровневый технический вычислительный язык и интерактивную среду для разработки алгоритмов, визуализации и анализа данных, числовых расчетов [6,7].

Программа **Simulink** является приложением к пакету **MATLAB**. При моделировании с использованием **Simulink** реализуется принцип визуального программирования, в соответствии с которым пользователь на экране из библиотеки стандартных блоков создает модель устройства и осуществляет расчеты. При этом, в отличие от классических способов моделирования, пользователю не нужно досконально изучать язык программирования и численные методы математики, а достаточно общих знаний, требующихся при работе на компьютере и, естественно, знаний той предметной области, в которой он работает.

Настоящий учебник базируется на использовании версии программы **MATLAB R2012b**.

Запуск Simulink

Для запуска программы необходимо предварительно запустить пакет **MATLAB**. Основное окно пакета **MATLAB** показано на рис. 1.5.

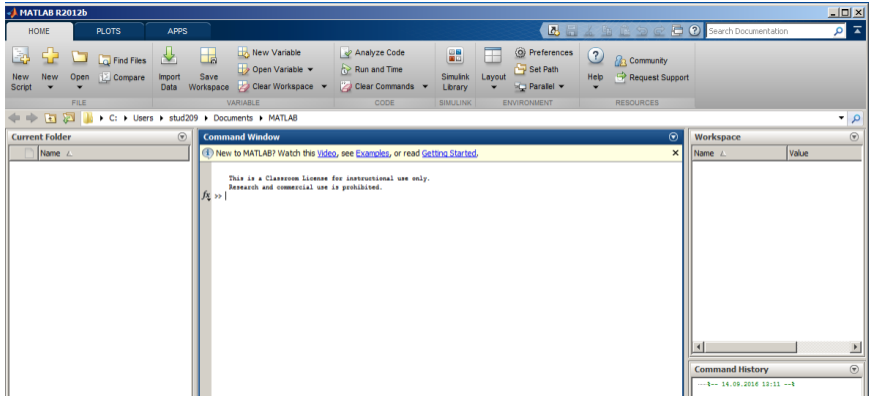


Рис. 1.5. Основное окно программы **MATLAB**

После открытия основного окна программы **MATLAB** нужно запустить программу **Simulink**. Это можно сделать одним из трех способов:

- Нажать кнопку (**Simulink**) на панели инструментов командного окна **MATLAB**.
- В командной строке главного окна **MATLAB** напечатать **Simulink** и нажать клавишу **Enter** на клавиатуре.
- Выполнить команды **File** → **New** → **Model**.

Использование первого и второго способов приводит к открытию окна обозревателя разделов библиотеки **Simulink** (рис. 1.6):

- 1 – заголовок с названием окна **Simulink Library Browser**;
- 2 – меню с командами **File, Edit, View, Help**;
- 3 – панель инструментов с ярлыками наиболее часто используемых команд;
- 4 – окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном блоке;
- 5 – список разделов библиотеки, реализованный в виде дерева;

6 – окно содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков);

7 – строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

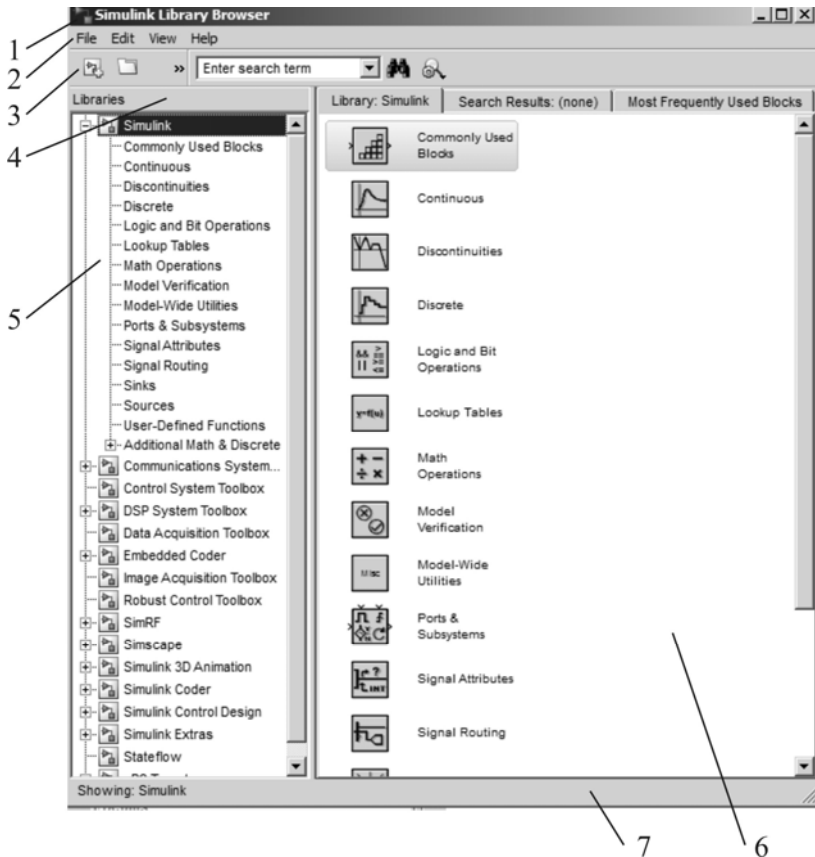


Рис. 1.6. Окно обозревателя разделов библиотеки **Simulink**

Обозреватель разделов библиотеки **Simulink**

На рис. 1.6 выделена основная библиотека **Simulink** (в левой части окна) и ее разделы (в правой части окна).

Библиотека **Simulink** содержит следующие основные разделы:

1. **Commonly Used Blocks** – часто используемые блоки;

2. **Continuous** – линейные блоки;
3. **Discontinuities** – пауза, разрыв;
4. **Discrete** – дискретные блоки;
5. **Logic and Bit Operations** – логика и операции;
6. **Lookup Tables** – справочные таблицы;
7. **Math Operations** – вычислительные операции;
8. **Model – Verifications** – подтверждение модели;
9. **Model – Wide Utilities** – возможности модели;
10. **Ports & Subsystems** – порты и подсистемы;
11. **Functions & Tables** – функции и таблицы;
12. **Signals Attributes** – свойства сигналов;
13. **Signals Routing** – маршрутизация сигналов;
14. **Sinks** – регистрирующие устройства;
15. **Sources** – источники сигналов и воздействий;
16. **User-Defined Functions** – функции, определяемые пользователем;
17. **Additional Math & Discrete** – дополнительные дискретные операции.

Список разделов библиотеки **Simulink** представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида:

- Пиктограмма свернутого узла дерева содержит символ «+», а пиктограмма развернутого содержит символ «-».
- Для того, чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши (ЛКМ).

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (рис. 1.7).

Для работы с окном используются команды, собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

- **File** (Файл) – Работа с файлами библиотек.
- **Edit** (Редактирование) – Добавление блоков и их поиск (по названию).
- **View** (Вид) – Управление показом элементов интерфейса.
- **Help** (Справка) – Вывод окна справки по обозревателю библиотек.

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис. 1.8).

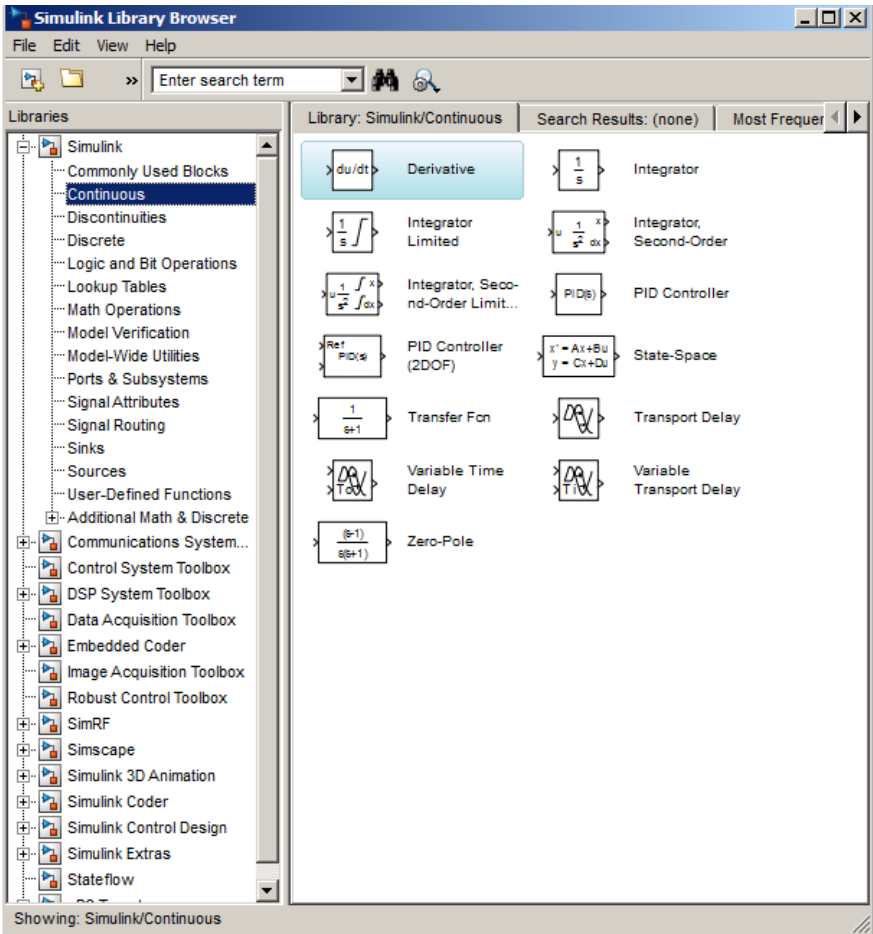


Рис. 1.7. Окно обозревателя с набором блоков раздела библиотеки

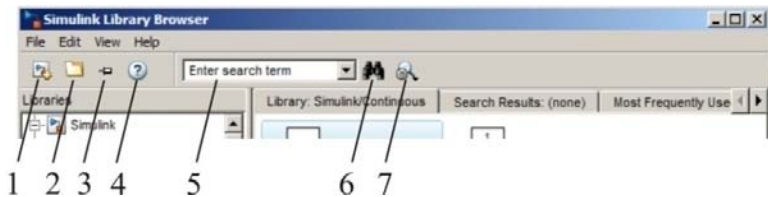


Рис. 1.8. Панель инструментов обозревателя разделов библиотек

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение:

- 1 – создать новую S-модель (открыть новое окно модели);
 - 2 – открыть одну из существующих S-моделей;
 - 3 – изменить свойства окна обозревателя. Данная кнопка позволяет установить режим отображения окна обозревателя «поверх всех окон». Повторное нажатие отменяет такой режим;
 - 4 – справка;
 - 5 – поиск блока по названию (по первым символам названия).
- После того как блок будет найден, в окне обозревателя откроется соответствующий раздел библиотеки, а блок будет выделен. Если же блок с таким названием отсутствует, то в окне комментария будет выведено сообщение **Not found**<имя блока> (Блок не найден);
- 6 – нормализация;
 - 7 – изменение размеров.

Создание модели

Для создания модели в среде **SIMULINK** необходимо последовательно выполнить ряд действий:

Создать новый файл модели с помощью команды **File→New→Model** или используя соответствующую кнопку на панели инструментов. Вновь созданное окно модели показано на рис. 1.9.

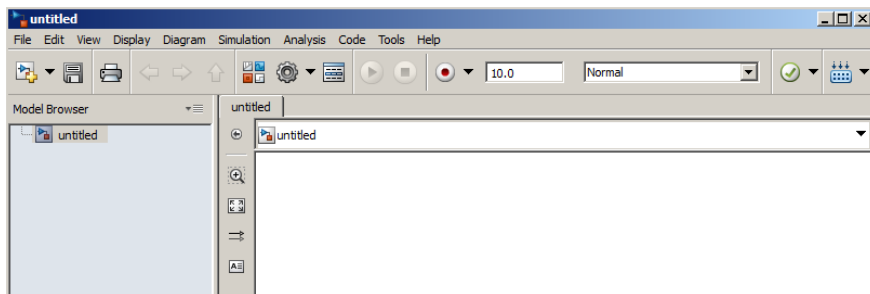


Рис. 1.9. Пустое окно модели

Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки (например, **Sources** – Источники). Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу «мыши», «перетащить» блок в созданное окно. **Клавишу мыши нужно держать нажатой**. На рис. 1.10 показано окно модели, содержащее блоки.

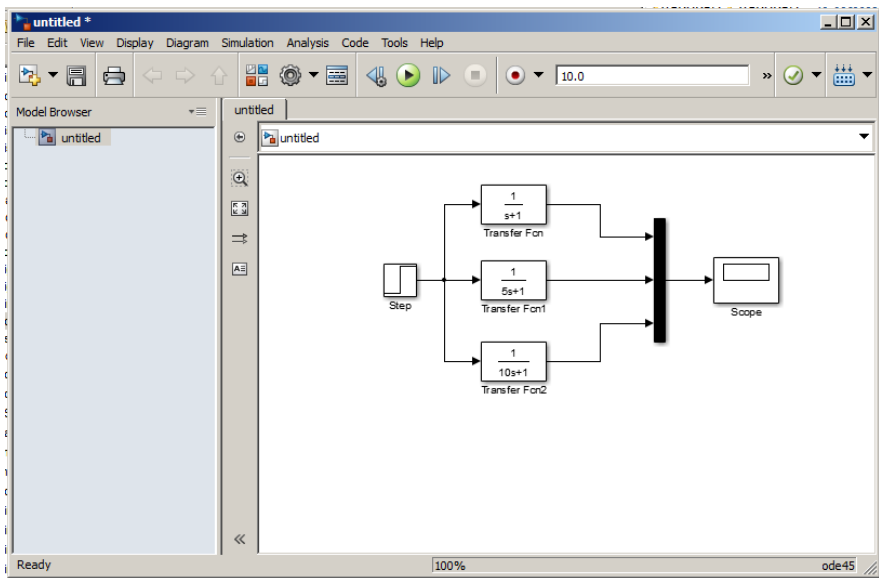


Рис. 1.10. Окно модели, содержащее блоки

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу «мыши»), а затем нажать клавишу **Delete** на клавиатуре.

Для изменения размеров блока требуется установить курсор в один из углов блока и, нажав левую клавишу «мыши», изменить размер блока (курсор при этом превратится в двухстороннюю стрелку).

Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные программой «по умолчанию». Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей «мыши», указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. При задании численных параметров следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой **ОК**. На рис. 1.11 в качестве примера показан блок, моделирующий передаточную функцию и окно редактирования параметров данного блока.

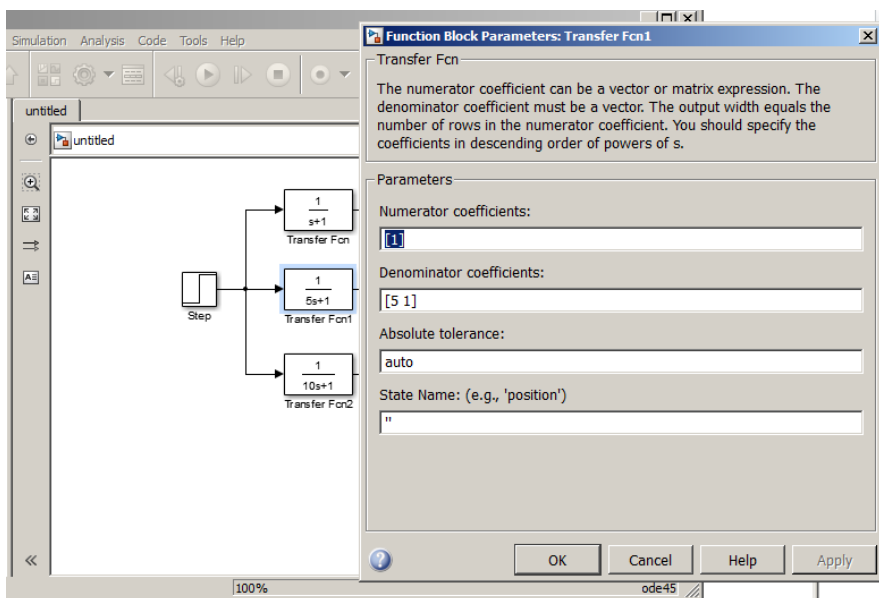


Рис. 1.11. Блок, моделирующий передаточную функцию и окно редактирования параметров блока

После установки на схеме всех блоков из требуемых библиотек нужно выполнить соединение элементов схемы. Для соединения блоков необходимо указать курсором на «выход» блока, а затем нажать и, не отпуская левую клавишу «мыши», провести линию к входу другого блока. После чего отпустить клавишу. В случае правильного соединения изображение стрелки на входе блока изменяет цвет. Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав правую клавишу «мыши», протянуть линию. Для удаления линии требуется выбрать линию (так же, как это выполняется для блока), а затем нажать клавишу **Delete** на клавиатуре. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана рис. 1.12.

После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню **File/Save As...** в окне схемы и указав папку и имя файла. Следует иметь в виду, что имя файла не должно превышать 32 символов, должно начинаться с буквы и не

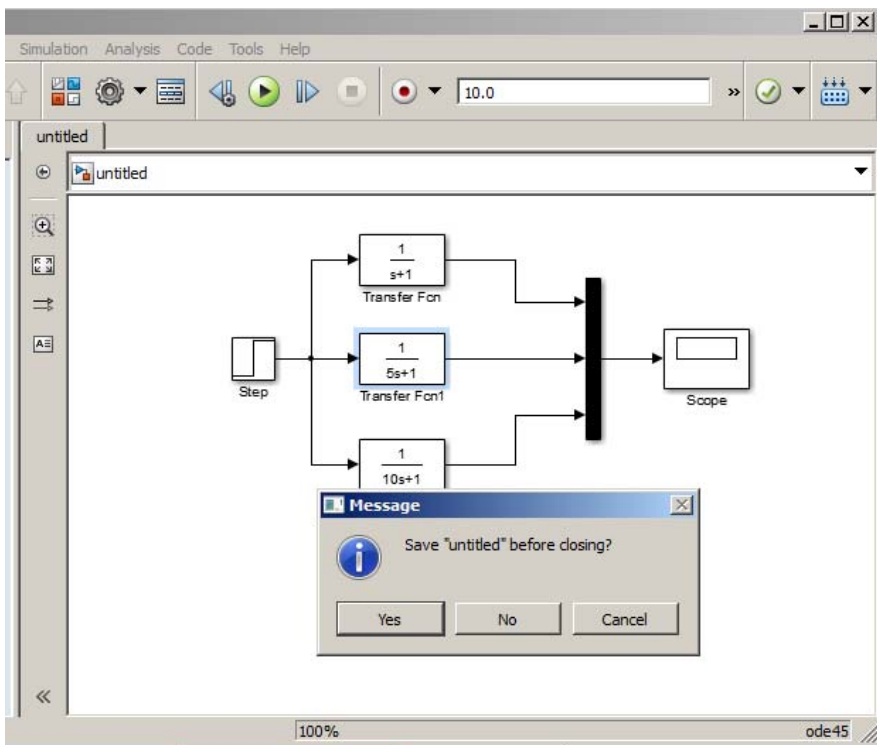


Рис. 1.12. Схема модели с окном ее сохранения, выпадающем при закрытии кадра

может содержать символы кириллицы и спецсимволы. Это же требование относится и к пути файла (к тем папкам, в которых сохраняется файл). При последующем редактировании схемы можно пользоваться пунктом меню **File/Save**. При повторных запусках программы **SIMULINK** загрузка схемы осуществляется с помощью меню **File/Open** в окне обозревателя библиотеки или из основного на **MATLAB**.

Окно модели

Окно модели содержит следующие элементы (см. рис. 1.9):

1. Заголовок с названием окна. Вновь созданному окну присваивается имя Untitled с соответствующим номером.
2. Меню с командами File, Edit, View и т.д.

3. Панель инструментов.
4. Окно для создания схемы модели.
5. Строка состояния, содержащая информацию о текущем состоянии модели.

Меню окна содержит команды для редактирования модели, ее настройки и управления процессом счета, работы файлами и т.п.:

- **File (Файл)** – Работа с файлами моделей.
- **Edit (Редактирование)** – Изменение модели и поиск блоков.
- **View (Вид)** – Управление показом элементов интерфейса.
- **Display (Дисплей)** – Отображение результатов.
- **Diagram (Диаграмма)** – Диаграмма.
- **Simulation (Моделирование)** – Задание настроек для моделирования и управления процессом расчета.
- **Analysis (Анализ)** – Настройка видов и параметров анализа.
- **Code (Код)** – Виды кодировок.
- **Tools (Инструментальные средства)** – Применение специальных средств для работы с моделью (отладчик, линейный анализ и т.п.).
- **Help (Справка)** – Вывод окон справочной системы.
- Для работы с моделью можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис. 1.13).

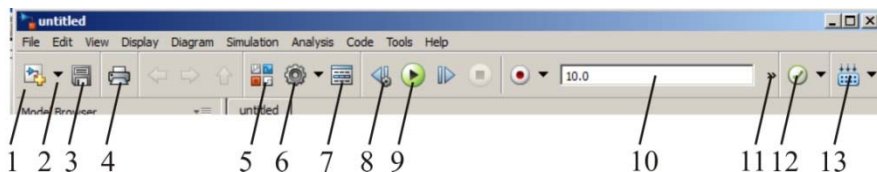


Рис. 1.13. Панель инструментов окна модели

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение:

1. **New Model** – Открыть новое (пустое) окно модели.
2. **Open Model** – Открыть существующий **mdl**-файл.
3. **Save Model** – Сохранить **mdl**-файл на диске.
4. **Print Model** – Вывод на печать блок-диаграммы модели.
5. **Cut** – Вырезать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения.

6. **Copy** – Скопировать выделенную часть модели в буфер промежуточного хранения.
7. **Paste** – Вставить в окно модели содержимое буфера промежуточного хранения.
8. **Undo** – Отменить предыдущую операцию редактирования.
9. **Redo** – Восстановить результат отмененной операции редактирования.
10. **Library Browser** – Открыть окно обозревателя библиотек.
11. **Toggle Model Browser** – Открыть окно обозревателя модели.
12. **Go to parent system** – Переход из подсистемы в систему высшего уровня иерархии («родительскую систему»). Команда доступна только в том случае, если открыта подсистема.
13. **Debug** – Запуск отладчика модели.

В нижней части окна модели находится строка состояния, в которой отображаются краткие комментарии к кнопкам панели инструментов, а также к пунктам меню, когда указатель мыши находится над соответствующим элементом интерфейса. Это же текстовое поле используется и для индикации состояния **Simulink: Ready** (Готов) или **Running** (Выполнение). В строке состояния отображаются также:

- масштаб отображения блок-диаграммы (в процентах, исходное значение равно 100%);
- индикатор степени завершенности сеанса моделирования (появляется после запуска модели);
- текущее значения модельного времени (выводится также только после запуска модели);
- используемый алгоритм расчета состояний модели (метод решения).

2 ТИПОВЫЕ ЗВЕНЬЯ САУ [8]

2.1 Основные понятия.

Виды и уравнения типовых звеньев

Любую систему автоматического управления (САУ) можно представить в виде соединения отдельных типовых звеньев. Типовым звеном (ТЗ) называют элемент или узел системы регулирования, который независимо от физической природы процессов, протекающих в нем, одинаково реагирует на один и тот же вид возмущения. Это означает, что два или несколько звеньев САУ будут одного типа, если они имеют одинаковую функциональную зависимость между входным и выходным параметрами.

Для всех ТЗ характерны некоторые общие признаки: каждое ТЗ имеет четко обозначенный вход и выход; сигнал через ТЗ распространяется в одном направлении – со входа на выход. В структурных схемах САУ типовое звено обозначают в виде прямоугольника, внутри которого записывается его функциональная зависимость, выраженная в операторной форме (передаточная функция).

Разбивка САУ на ТЗ облегчает анализ и синтез системы, так как позволяет воспользоваться хорошо разработанными в теории автоматического управления методами.

По виду функциональной зависимости ТЗ подразделяются: на апериодическое, колебательное, дифференцирующее, интегрирующее, усилительное и звено чистого запаздывания. Это основные типы звеньев, с использованием которых могут быть получены другие типовые звенья, но не более второго порядка (по виду дифференциального уравнения). Уравнения ТЗ систем регулирования выводятся на основе тех или иных физических законов, по которым протекают процессы в звеньях. При исследовании динамики в САУ нужно уметь не только выделять ТЗ в системе регулирования и составлять их уравнения, но и определять численные значения входящих в уравнения коэффициентов. Существуют два метода определения

этих коэффициентов: расчетный и экспериментальный. Расчетный метод не во всех случаях достаточно точен. Принятые при выводе уравнений допущения могут привести к существенным ошибкам. Поэтому на этапе доводки САУ часто применяют экспериментальный метод определения коэффициентов. При этом можно воспользоваться переходными или частотными характеристиками ТЗ.

В качестве примеров рассмотрены звенья, которые часто реализуются в САУ авиационных двигателей. При выводе уравнений ТЗ основная трудность заключается в обосновании и принятии упрощающих допущений. Учет многих факторов приводит к усложнению расчетной модели, а принятие грубых допущений – к исключению из анализа основных свойств звена. Поэтому нужно всегда иметь в виду, что в рамках какой расчетной динамической модели системы будет исследоваться то или иное звено.

Апериодическое типовое звено. Одновальный ГТД (рис. 2.1,а) при определенных допущениях является характерным примером аperiодического ТЗ.

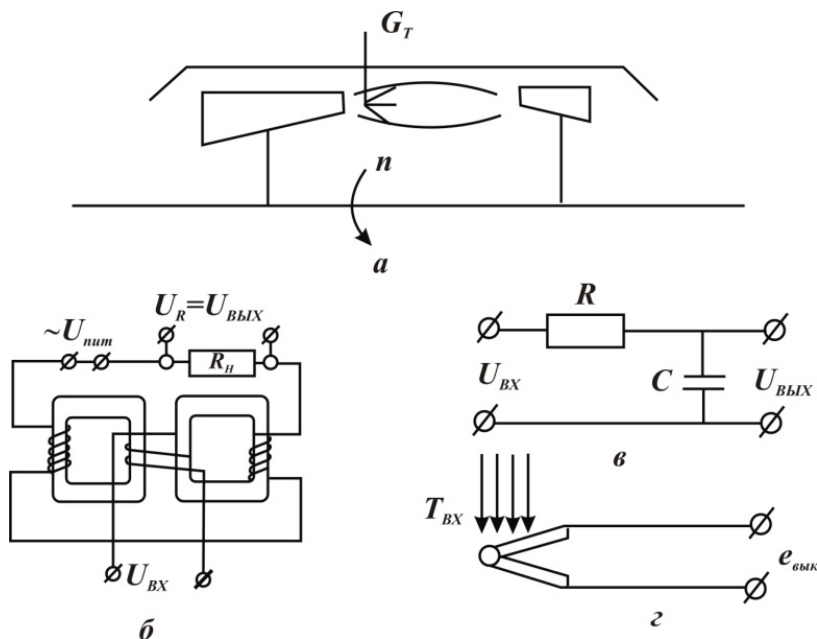


Рис. 2.1. Примеры аperiодических типовых звеньев

Для ГТД одним из основных выходных регулируемых параметров является частота вращения ротора двигателя n , а входных – расход топлива в камере сгорания G_T . Основной зависимостью, которая используется при проектировании САУ двигателя, является выражение, связывающее частоту вращения ротора n и расход топлива G_T в неустановившемся режиме. Эта зависимость определяется уравнением движения ротора двигателя

$$\frac{\pi}{30} \cdot I \cdot \frac{dn}{dt} = M_T(n, G_T) - M_K(n), \quad (2.1)$$

где I – момент инерции ротора двигателя;
 $M_T(n, G_T)$ – момент, развиваемый турбиной;
 $M_K(n)$ – момент противодействия компрессора.

Принимая допущение о малости изменения параметров n и G_T в «окрестности» какого-либо установившегося режима, можно представить уравнение (2.1) в следующей линеаризованной форме:

$$\frac{\pi}{30} \cdot I \cdot \frac{d\Delta n}{dt} = \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0 \Delta n + \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T - \left(\frac{dM_K}{dn} \right)_0 \Delta n$$

или

$$\frac{\pi}{30} \cdot I \cdot \frac{d\Delta n}{dt} + \left[\left(\frac{dM_K}{dn} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0 \right] \Delta n = \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T, \quad (2.2)$$

где Δn , ΔG_T малые отклонения параметров от их установившихся значений; индекс «0» соответствует значениям производных, взятых для установившегося режима – n_0 , G_{T0} .

Уравнение (2.2) является дифференциальным уравнением ГТД, которое можно представить в стандартной форме:

$$T \frac{d\Delta n}{dt} + \Delta n = k \Delta G_T,$$

где

$$T = \frac{I \frac{\pi}{30}}{\left(\frac{dM_K}{dn} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0} - \text{постоянная времени двигателя;}$$

$$k = \frac{\left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T}\right)_0}{\left(\frac{dM_K}{dn}\right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n}\right)_0} - \text{коэффициент усиления двигателя.}$$

ГТД как объект регулирования представляет собой аperiodическое ТЗ, дифференциальное уравнение которого имеет вид:

$$T \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}}, \quad (2.3)$$

где $x_{\text{ВХ}}$, $x_{\text{ВЫХ}}$ – входной и выходной параметры ТЗ; T – постоянная времени;

k – коэффициент усиления ТЗ.

Уравнением аperiodического звена описываются также магнитный усилитель (рис. 2.1,б), электрическая RC - цепь (рис. 2.1,в), термopа (рис. 2.1,г). Например, для электрической цепи на основании второго закона Кирхгофа можно записать:

$$U_{\text{ВХ}} = U_R + U_C = iR + U_{\text{ВЫХ}}. \quad (2.4)$$

Ток в цепи определяется выражением $i = C \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt}$, подставляя которое в уравнение (2.4), получим:

$$RC \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}. \quad (2.5)$$

Обозначив $T=RC$, можно записать уравнение (2.5) в форме уравнения аperiodического звена:

$$T \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}.$$

Колебательное типовое звено. Из теоретической механики известно, что любую колебательную систему с одной степенью свободы (рис. 2.2,а) можно описать дифференциальным уравнением второго порядка

$$T^2 \frac{d^2 x_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + 2T\zeta \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = kx_{\text{ВХ}}, \quad (2.6)$$

где T – постоянная времени, характеризующая собственную частоту колебаний системы;

ζ – коэффициент демпфирования;

k – коэффициент усиления или коэффициент передачи.

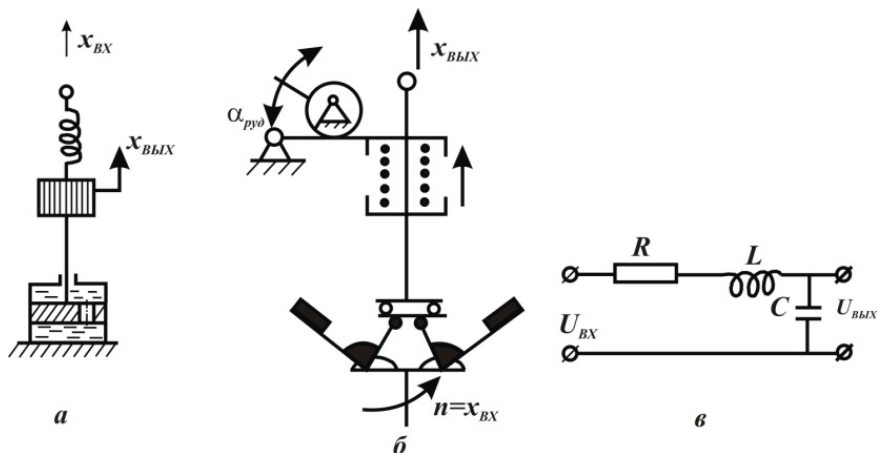


Рис. 2.2. Примеры колебательных типовых звеньев

Звено, описываемое дифференциальным уравнением (2.6), называют колебательным ТЗ. К колебательному ТЗ можно отнести также центробежный чувствительный элемент частоты вращения (рис. 2.2,б) и электрический колебательный контур (рис. 2.2,в). Согласно второму закону Кирхгофа для электрической цепи можно записать:

$$U_{ВХ} = U_L + U_R + U_C. \quad (2.7)$$

Падения напряжения на индуктивности L , активном сопротивлении R и емкости C определяются из выражений:

$$U_L = L \frac{di}{dt}; \quad U_R = iR; \quad U_C = U_{ВЫХ}, \quad (2.8)$$

где $i = C \frac{dU_C}{dt} = C \frac{dU_{ВЫХ}}{dt}$.

Подставляя выражения (2.8) в уравнение (2.7) с учетом равенства для тока i , получим:

$$LC \frac{d^2 U_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + RC \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}$$

или

$$T^2 \frac{d^2 U_{\text{ВЫХ}}}{dt^2} + 2T\zeta \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}}, \quad (2.9)$$

где $T = \sqrt{LC}$ – постоянная величина; $\zeta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}}$ – коэффициент демпфирования.

Как видно из уравнения (2.9), электрический контур представляет колебательное ТЗ.

Дифференцирующее типовое звено. Дифференцирующее ТЗ может быть идеальным и реальным. Идеальное дифференцирующее ТЗ описывается зависимостью

$$x_{\text{ВЫХ}} = k \frac{dx_{\text{ВХ}}}{dt}, \quad (2.10)$$

где k – коэффициент передачи звена.

Примером идеального дифференцирующего ТЗ является подпружиненный поршень (рис. 2.3,а), применяемый как корректирующее устройство для улучшения динамических свойств регулятора. Уравнение такого поршня связывает давления $\Delta P_{\text{вх}}$ на входе с динамическим расходом жидкости ΔQ в выходном канале. Считая жидкость несжимаемой и допуская, что инерционные силы и силы трения малы, можно записать уравнения баланса сил и расхода жидкости:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{\text{вх}} F_{\text{П}} &= 2C_{\text{ПП}} \Delta x \\ \Delta Q &= F_{\text{П}} \frac{d\Delta x}{dt} \end{aligned} \right\}, \quad (2.11)$$

где $F_{\text{П}}$ – площадь поршня;

$C_{\text{ПП}}$ – жесткость пружины;

Δx – перемещение поршня.

В результате совместного решения уравнений (2.11) получим:

$$\Delta Q = k \frac{d\Delta p}{dt}, \quad (2.12)$$

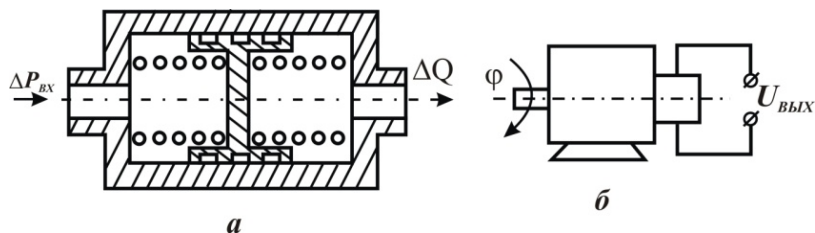


Рис. 2.3. Примеры идеальных дифференцирующих типовых звеньев

где $k = \frac{F_{\Pi}^2}{2C_{\Pi P}}$ – коэффициент передачи статической части регулятора.

Если обозначить $\Delta Q = x_{\text{ВЫХ}}$, а $\Delta p = x_{\text{ВХ}}$, то уравнение (2.12) примет вид уравнения для идеального дифференцирующего ТЗ (2.10). Другим примером этого ТЗ является тахогенератор (рис. 2.3,б). Напряжение на выходе из тахогенератора $U_{\text{ВЫХ}}$ пропорционально частоте вращения или производной от угла поворота якоря:

$$U_{\text{ВЫХ}} = k \frac{d\varphi}{dt}.$$

Примером реального дифференцирующего звена является катаркт (рис. 2.4,а), устанавливаемый в цепи местной обратной связи изодромного регулятора и служащий для улучшения качества переходного процесса в САУ. Входным параметром является перемещение штока поршня $x_{\text{ВХ}}$, а выходным – координата цилиндра $x_{\text{ВЫХ}}$.

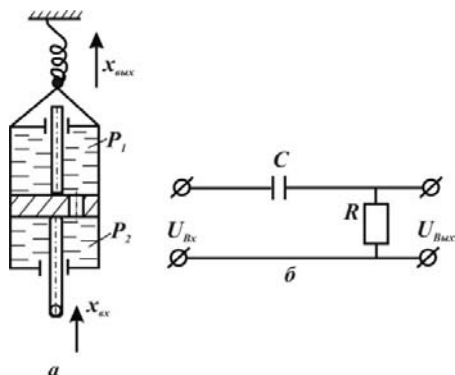


Рис. 2.4. Примеры реальных дифференцирующих типовых звеньев

Из совместного решения уравнений баланса сил

$$F_{\Pi} (p_1 - p_2) = x_{\text{ВЫХ}} C_{\text{ПП}},$$

расхода через отверстие в поршне

$$Q_{\text{Ж}} = F_{\Pi} \left(\frac{dx_{\text{ВХ}}}{dt} - \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} \right),$$

а также движения жидкости через жиклер

$$p_1 - p_2 = R_{\text{Ж}} Q_{\text{Ж}}$$

получим уравнение катаракта

$$\frac{F_{\Pi}^2 R_{\text{Ж}}}{C_{\text{ПП}}} \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = \frac{F_{\Pi}^2 R_{\text{Ж}}}{C_{\text{ПП}}} \frac{dx_{\text{ВХ}}}{dt}, \quad (2.13)$$

где F_{Π} – площадь поршня;

$C_{\text{ПП}}$ – жесткость пружины;

$R_{\text{Ж}}$ – гидравлическое сопротивление жиклера (при ламинарном движении жидкости);

$Q_{\text{Ж}}$ – объемный расход жидкости через жиклер.

Уравнение (2.13) можно представить в следующем виде:

$$T \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} + x_{\text{ВЫХ}} = kT \frac{dx_{\text{ВХ}}}{dt}, \quad (2.14)$$

где $T = \frac{F_{\Pi}^2 R_{\text{Ж}}}{C_{\text{ПП}}}$ – постоянная времени; k – коэффициент передачи

звена (в данном случае $k=1$).

Уравнение (2.14) является уравнением реального дифференцирующего звена. Другим примером такого звена является электрическая CR -цепь (рис. 2.4,б). Воспользовавшись вторым законом Кирхгофа, можно вывести для этой цепи уравнение

$$RC \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} + U_{\text{ВЫХ}} = RC \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}. \quad (2.15)$$

Интегрирующее типовое звено. Интегрирующее ТЗ характеризуется тем, что выходной параметр определяется интегралом по времени от входного параметра и описывается зависимостью

$$x_{\text{вых}} = k \int_0^t x_{\text{вх}}(t) dt, \quad (2.16)$$

где k – коэффициент передачи звена.

Наглядными примерами интегрирующего звена являются гидrocиллиндры различных типов и гидромеханический усилитель (рис. 2.5).

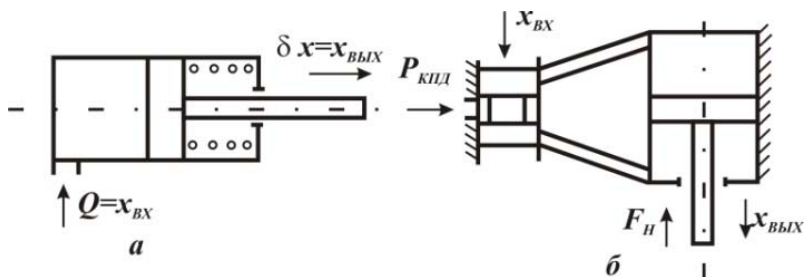


Рис. 2.5. Примеры интегрирующих типовых звеньев

Перемещение выходного штока $\delta_x = x_{\text{вых}}$ гидравлического цилиндра, представленного на рис. 2.5,а, и расход поступающей жидкости ($Q = x_{\text{вх}}$) связаны соотношением

$$x_{\text{вых}} = k \int_0^t \frac{Q}{S} dt, \quad (2.17)$$

где S – площадь цилиндра.

При выводе уравнения гидромеханического усилителя, представленного на рис. 2.5,б, в качестве упрощающих допущений можно принять сопротивление нагрузки F_H и давление в питающем трубопроводе $P_{\text{кпл}}$ постоянными, ширину поясков управляющего золотника равной ширине отверстий, отсутствие сил трения и утечек в золотнике и силовом цилиндре и отсутствие давления на сливе жидкости из золотника.

С учетом принятых допущений скорость перемещения поршня может быть определена в следующем виде:

$$V_{x_{\text{ВЫХ}}} = \frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{\mu L}{S} \sqrt{\left(P_{\text{КПД}} - \frac{F_H}{S}\right) \frac{1}{\rho_{\text{Ж}}}} x_{\text{ВХ}}, \quad (2.18)$$

где μ – коэффициент расхода в щелях золотника; S – площадь силового поршня; $\rho_{\text{Ж}}$ – плотность жидкости; L – длина цилиндра.

Обозначив величиной K в формуле (2.18) выражение

$$\frac{\mu L}{S} \sqrt{\left(P_{\text{КПД}} - \frac{F_H}{S}\right) \frac{1}{\rho_{\text{Ж}}}} = K, \quad (2.19)$$

уравнение усилителя можно записать в виде:

$$\frac{dx_{\text{ВЫХ}}}{dt} = Kx_{\text{ВХ}}, \quad (2.20)$$

которое после несложных преобразований представляет собой уравнение интегрирующего звена (2.16):

$$x_{\text{ВЫХ}} = k \int_0^t x_{\text{ВХ}} dt. \quad (2.21)$$

2.2 Переходные характеристики типовых звеньев

Переходная характеристика ТЗ представляет собой изменение во времени выходного параметра звена $x_{\text{ВЫХ}}(t)$ при ступенчатом входном сигнале и нулевых начальных условиях.

$$x_{\text{ВХ}}(t) = x_0 [1(t)]. \quad (2.22)$$

В формуле (2.22) приняты обозначения: x_0 – величина ступени входного сигнала; $1(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0 \\ 1 & \text{при } t \geq 0 \end{cases}$ – единичная ступенчатая функция (функция Хевисайда) (рис. 2.6).

Переходная характеристика или переходная функция определяется как решение дифференциального уравнения ТЗ при ступенчатом входном сигнале.

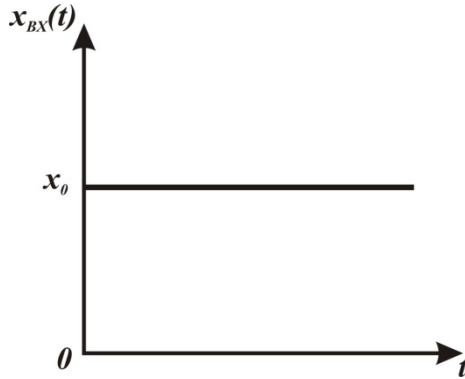


Рис. 2.6. Ступенчатая функция

Апериодическое ТЗ. Переходная функция этого ТЗ определяется как решение дифференциального уравнения (2.23). Известно, что решение неоднородного дифференциального уравнения (2.23) складывается из общего решения $(x_{\text{вых}})_{\text{общ}}$ однородного уравнения

$$T \frac{dx_{\text{вых}}}{dt} + x_{\text{вых}} = 0 \quad (2.23)$$

и частного решения $(x_{\text{вых}})_{\text{частн}}$ неоднородного уравнения (2.23):

$$x_{\text{вых}}(t) = (x_{\text{вых}})_{\text{общ}} + (x_{\text{вых}})_{\text{частн}}. \quad (2.24)$$

Общее решение уравнения первого порядка (2.23) записывается в виде

$$(x_{\text{вых}})_{\text{общ}} = Ce^{rt},$$

где C – постоянная интегрирования, определяемая с использованием начальных условий;

$r = -1/T$ – корень характеристического уравнения $Tr + 1 = 0$.

Частное решение $(x_{\text{вых}})_{\text{частн}}$ записывается в форме правой части, т. е. $(x_{\text{вых}})_{\text{частн}} = kx_0$. Тогда решение уравнения аperiodического ТЗ примет вид:

$$x_{\text{вых}}(e) = kx_0 + Ce^{-t/T}.$$

Для определения C воспользуемся нулевыми начальными условиями.

При $t=0$ имеем $0=kx_0+C$ или $C=-kx_0$. Подставляя значение C в выражение для $x_{\text{вых}}(t)$, получим переходную функцию апериодического ТЗ:

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_0 [1 - e^{-t/T}].$$

График переходной функции апериодического ТЗ (рис. 2.7,а) представляет экспоненциальную нарастающую кривую. Значения $x_{\text{вых}}$ при $t=T$ и $t=\infty$ определяются соответственно выражениями:

$$x_{\text{вых}} = kx_0 [1 - e^{-1}] = 0,632kx_0; \quad x_{\text{вых}} = kx_0.$$

Следовательно, постоянная времени T равна времени, в течение которого выходной параметр достигает величины 0,632 от нового установившегося значения. Чем больше постоянная времени T , тем медленнее протекает переходный процесс в ТЗ (рис. 2.7,б).

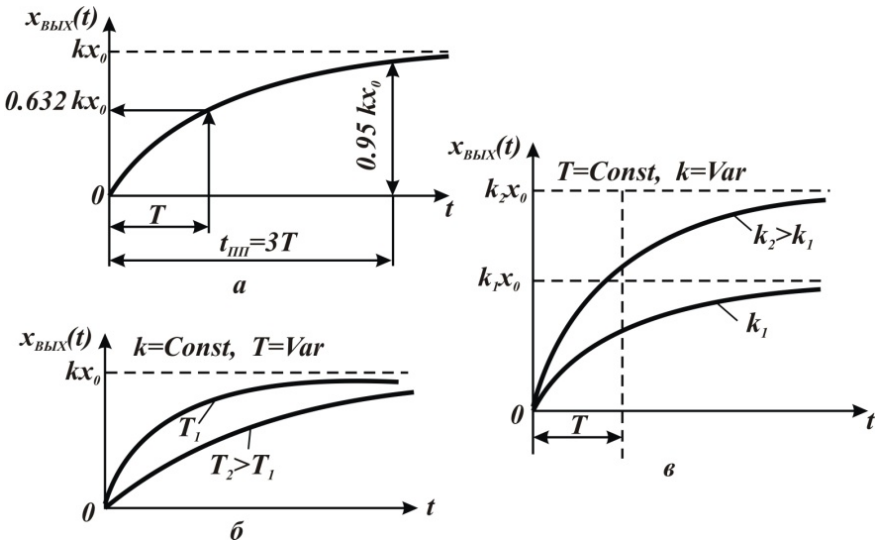


Рис. 2.7. Переходные характеристики апериодического типового звена

Обычно переходный процесс считается законченным, если $x_{\text{вых}}$ достиг 95% своего установившегося значения, т. е. $x_{\text{вых}}=0,95kx_0$. Это соответствует времени $t_{\text{III}}=3T$, т. е. переходный процесс в аperiodическом ТЗ можно считать практически законченным по истечении времени $3T$. При различных значениях коэффициента передачи k , но одинаковом T , переходные характеристики отличаются лишь величиной выходного параметра, а время переходного процесса t_{III} этих звеньев одинаковое (рис. 2.7,в).

Колебательное ТЗ. Это звено является одним из сложных ТЗ, переходная функция которого определяется из решения дифференциального уравнения второго порядка (2.6). Вид переходной функции определяется корнями характеристического уравнения $T^2r^2 + 2\zeta \cdot Tr + 1 = 0$:

$$r_1 = \frac{-\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}}{T}; \quad r_2 = \frac{-\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}}{T}.$$

При значениях коэффициента демпфирования $0 < \zeta < 1$ корни будут комплексно-сопряженными:

$$r_1 = -\alpha + j\omega_c; \quad r_2 = -\alpha - j\omega_c, \quad (2.25)$$

где $\alpha = \zeta / T$ коэффициент, характеризующий затухание колебаний в ТЗ;

$$\omega_c = \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{T} \text{ – собственная частота колебаний ТЗ;}$$

$$j = \sqrt{-1}.$$

После решения дифференциального уравнения (2.6) при $0 < \zeta < 1$ получим переходную функцию колебательного ТЗ:

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_0 \left[1 - Be^{-\alpha t} \sin(\omega_c t + \varphi) \right], \quad (2.26)$$

$$\text{где } B = \sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{\omega_c^2}}; \quad \varphi = \arctg \frac{\omega_c}{\alpha}.$$

Из анализа переходной характеристики (рис. 2.8,а), построенной по формуле (2.26), следует, что при коэффициенте демпфирования

ния $0 < \zeta < 1$ переходный процесс в колебательном ТЗ сопровождается затухающими колебаниями с частотой ω_C и амплитудой, уменьшающейся по экспоненте $e^{-\alpha t}$.

Промежуток времени между экстремумами, расположенными рядом с одной стороны от нового установившегося значения $x_{\text{вых}} = kx_0$, равен периоду собственных колебаний $\tau_C = 2\pi / \omega_C$. Если известен переходный процесс для колебательного ТЗ и требуется определить T и ζ , то достаточно определить τ_C и декремент затухания α , определяемый по величине снижения амплитуды колебаний за половину периода.

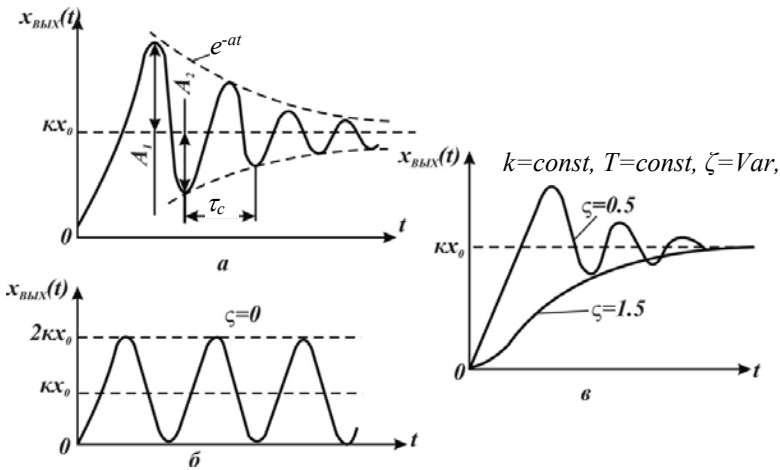


Рис. 2.8. Переходные характеристики колебательного типового звена

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{Be^{0-\alpha}}{Be^{-\alpha \frac{\tau_C}{2}}} = e^{\alpha \frac{\tau_C}{2}}. \quad (2.27)$$

Логарифмируя левую и правую части уравнения (2.27), получим:

$$\alpha = \frac{2}{\tau_C} \ln \frac{A_1}{A_2} = \frac{2}{\tau_C} 2,311 \lg \frac{A_1}{A_2}.$$

При известных α и $\omega_c = 2\pi / \tau_c$ легко определить T и ζ по формулам:

$$T = \frac{1}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_c^2}}; \zeta = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_c^2}}. \quad (2.28)$$

При $\zeta \geq 1$ переходная характеристика ТЗ не имеет колебаний и становится похожей на переходную характеристику апериодического ТЗ (рис. 2.8,в). Поэтому колебательное звено при $\zeta \geq 1$ иногда называют апериодическим звеном второго порядка. При отсутствии демпфирования ($\zeta = 0$) колебательное ТЗ называют консервативным колебательным ТЗ. Переходный процесс в этом звене сопровождается незатухающими колебаниями (рис. 2.8,б).

На практике всегда имеется трение и потери энергии, поэтому переходный процесс в колебательном ТЗ имеет затухающий характер.

Построение переходной характеристики колебательного ТЗ облегчается, если воспользоваться формулой (2.27). Имея в виду, что при $t=0$ справедливо равенство $A_1 = kx_0$, максимальные отклонения переходной характеристики при $t = i \frac{\tau_c}{2}$ относительно прямой $x_{\text{вых}} = kx_0$ в соответствии с формулой (2.27) будут равны

$$A_i = kx_0 e^{-i\alpha \frac{\tau_c}{2}},$$

где $i=0; 1; 2; \dots$ – номер экстремальной точки переходной характеристики.

Соединяя экстремальные точки плавной кривой, получим переходную характеристику колебательного ТЗ.

Реальное дифференцирующее ТЗ. Переходная функция реального дифференцирующего ТЗ определяется из решения дифференциального уравнения (2.14) при $x_{\text{вх}} = x_0 [1(t)]$ и имеет следующий вид:

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_0 e^{-t/T}. \quad (2.29)$$

Переходная характеристика (рис. 2.9,а) реального дифференцирующего ТЗ, построенная по формуле (2.29), представляет нисходящую экспоненциальную кривую. При $t=0$ $x_{\text{вых}} = kx_0$, а при $t=T$ $x_{\text{вых}} = 0,368kx_0$, т. е. постоянная времени T представляет собой время, в течение которого выходной параметр принимает величину, равную 36,8% от первоначального значения (при $t=0$). Из переходных характеристик (рис. 2.9,б) следует, что чем больше постоянная времени, тем медленнее протекает переходный процесс в реальном дифференцирующем ТЗ. Величина коэффициента передачи k не влияет на время переходного процесса (рис. 2.9,в).

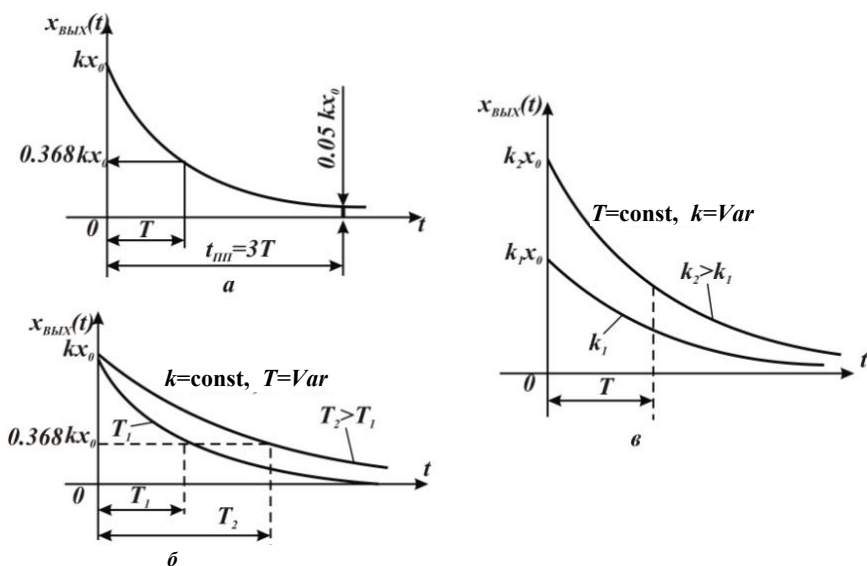


Рис. 2.9. Переходные характеристики реального дифференцирующего типового звена

Интегрирующее ТЗ. Переходная функция интегрирующего ТЗ определяется в результате интегрирования левой и правой частей дифференциального уравнения (2.16) при $x_{\text{вх}} = x_0 [1(t)]$ и имеет следующий вид:

$$x_{\text{вых}}(t) = kx_0 t. \quad (2.30)$$

Из формулы (2.30) следует, что переходная характеристика (рис. 2.10) интегрирующего ТЗ представляет собой нарастающую наклонную прямую, темп нарастания которой зависит от коэффициента передачи k . Чем больше k , тем быстрее протекает переходный процесс.

В отличие от переходных характеристик других ТЗ переходная характеристика интегрирующего ТЗ не стремится к какому-либо значению, а все время имеет нарастающий характер.

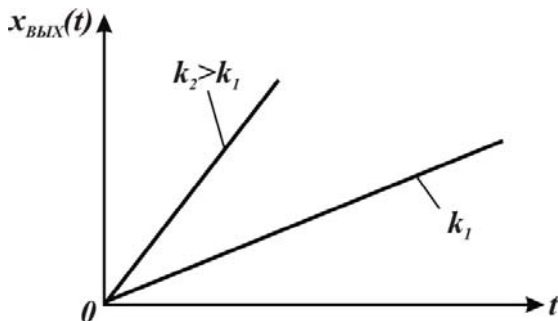


Рис. 2.10. Переходные характеристики интегрирующего типового звена

2.3 Частотные характеристики типовых звеньев

Частотные характеристики ТЗ получают при гармоническом входном воздействии, заданном либо в тригонометрической форме:

$$x_{\text{ВХ}}(t) = A_{\text{ВХ}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{ВХ}}),$$

либо в экспоненциальной форме:

$$x_{\text{ВХ}}(t) = A_{\text{ВХ}} e^{(\omega t + \varphi_{\text{ВХ}})},$$

где $A_{\text{ВХ}}$ — амплитуда; ω — круговая частота; $\varphi_{\text{ВХ}}$ — начальная фаза входного сигнала; $j = \sqrt{-1}$.

При этом выходной сигнал изменяется также по гармоническому (рис. 2.11) с той же частотой ω , но с другой амплитудой $A_{\text{ВЫХ}}$ и начальной фазой $\varphi_{\text{ВЫХ}}$:

$$x_{\text{ВЫХ}}(t) = A_{\text{ВЫХ}} \sin(\omega t + \varphi_{\text{ВЫХ}}).$$

Зависимость отношения комплексной амплитуды $A_{\text{ВЫХ}} e^{j\varphi_{\text{ВЫХ}}}$ выходного сигнала к комплексной амплитуде $A_{\text{ВХ}} e^{j\varphi_{\text{ВХ}}}$ входного сигнала от частоты колебаний называют частотной функцией, которая будет:

$$W(j\omega) = \frac{A_{\text{ВЫХ}} e^{j\varphi_{\text{ВЫХ}}}}{A_{\text{ВХ}} e^{j\varphi_{\text{ВХ}}}} = M(\omega) e^{j\varphi(\omega)},$$

где $M(\omega) = \frac{A_{\text{ВЫХ}}}{A_{\text{ВХ}}}$ – модуль частотной функции или амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);

$\varphi(\omega) = \varphi_{\text{ВЫХ}} - \varphi_{\text{ВХ}}$ – аргумент частотной функции, или фазо-частотная характеристика (ФЧХ).

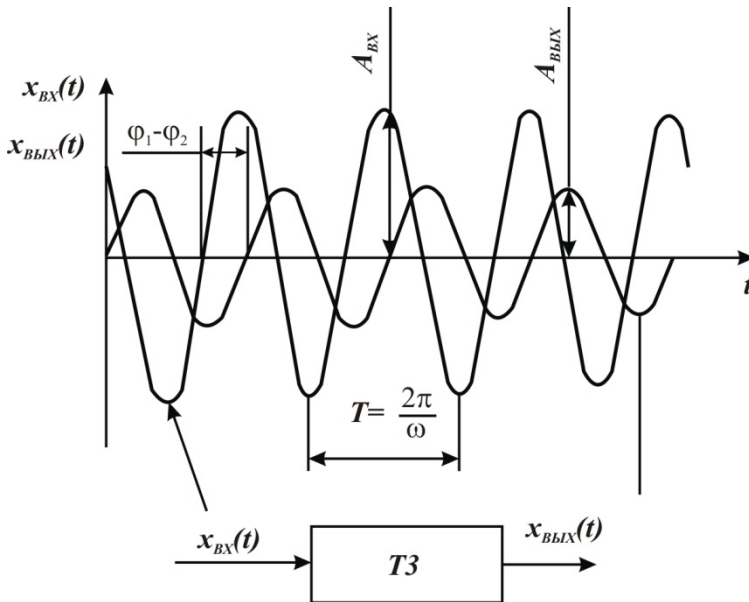


Рис. 2.11. Осциллограмма колебаний входного и выходного параметров ТЗ при определении его частотных характеристик

Частотная характеристика ТЗ может быть представлена на комплексной плоскости, если предварительно представить частотную функцию в виде

$$W(j\omega) = \operatorname{Re}W + j\operatorname{Im}W,$$

где $\operatorname{Re}W = M(\omega)\cos\varphi(\omega)$ – действительная часть частотной функции;

$j\operatorname{Im}W = M(\omega)\sin\varphi(\omega)$ – мнимая часть частотной функции.

Частотная характеристика ТЗ на комплексной плоскости называется амплитудно-фазочастотной характеристикой (АФЧХ) типового звена. Частотная функция ТЗ может быть получена из выражений для его передаточной функции $W(s)$, представляющей собой отношение изображений то Лапласу выходной величины $\tilde{x}_{\text{вых}}$ и входной величины $\tilde{x}_{\text{вх}}$ при нулевых начальных условиях

$$W(s) = \frac{\tilde{x}_{\text{вых}}}{\tilde{x}_{\text{вх}}},$$

где s – оператор Лапласа.

Для получения передаточной функции ТЗ достаточно в дифференциальном уравнении звена произвести замену операции дифференцирования d/dt на оператор Лапласа s , входную $\tilde{x}_{\text{вх}}$ и выходную $\tilde{x}_{\text{вых}}$ величины, представить их изображениями по Лапласу $\tilde{x}_{\text{вх}}$, $\tilde{x}_{\text{вых}}$ и решить это уравнение относительно $\frac{\tilde{x}_{\text{вых}}}{\tilde{x}_{\text{вх}}}$. Если в выражении для

$W(s)$ заменить S на $j\omega$, то получим частотную функцию $W(j\omega)$ звена.

Теоретическое исследование частотных характеристик ТЗ связано с приведением дифференциальных уравнений ТЗ к записи их в операторной форме, определением и анализом передаточной и частотной функций звеньев.

Апериодическое ТЗ. Дифференциальное уравнение (2.3) этого звена, записанное в операторной форме, имеет вид:

$$(Ts + 1)\tilde{x}_{\text{вых}} = k\tilde{x}_{\text{вх}}.$$

Решив его относительно $\frac{\tilde{x}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{x}_{\text{ВХ}}}$, получим выражение для передаточной функции апериодического ТЗ:

$$W(s) = \frac{\tilde{x}_{\text{ВЫХ}}}{\tilde{x}_{\text{ВХ}}} = \frac{k}{Ts + 1}. \quad (2.31)$$

Заменяв в соотношении (2.31) s на $j\omega$, получим выражение для частотной функции апериодического ТЗ:

$$W(j\omega) = \frac{k}{1 + jT\omega}. \quad (2.32)$$

Умножив числитель и знаменатель правой части равенства (2.32) на комплексно-сопряженное выражение знаменателя $(1 - jT\omega)$ и преобразовав его, получим:

$$W(j\omega) = \text{Re}W + j\text{Im}W = \frac{k}{1 + T^2\omega^2} - j\frac{kT\omega}{1 + T^2\omega^2}.$$

Тогда АЧХ и ФЧХ будут определяться из выражений:

$$M(\omega) = \sqrt{\text{Re}^2W + \text{Im}^2W} = \frac{k}{\sqrt{1 + T^2\omega^2}}, \quad (2.33)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\text{Im}W}{\text{Re}W} = \text{arctg}(-\omega T). \quad (2.34)$$

Из формулы (2.33) для АЧХ апериодического ТЗ следует, что с увеличением частоты колебаний величина $M(\omega)$ уменьшается, что характеризует уменьшение $A_{\text{ВЫХ}}$ при $A_{\text{ВХ}} = \text{const}$. Апериодическое ТЗ обладает свойством низкочастотного фильтра: хорошо пропускает сигналы низких частот и плохо – сигналы высоких частот колебаний (рис. 2.12, а). Из ФЧХ апериодического ТЗ (рис. 2.12,б) ясно, что выходные колебания отстают по фазе от входных колебаний тем больше, чем больше частота колебаний. При $\omega \rightarrow \infty$ амплитуда $A_{\text{ВЫХ}}$ стремится к нулю, а $\varphi(\omega)$ – стремится к $-\pi/2$.

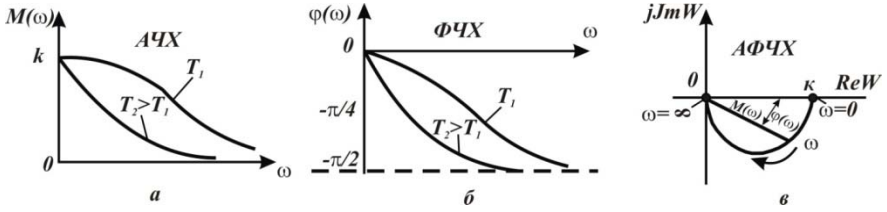


Рис. 2.12. Частотные характеристики аperiodического типового звена

АФЧХ типового звена можно построить с использованием выражений как для ReW и ImW , так и для $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$. При построении АФЧХ по $M(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ для каждой частоты ω проводят от начала координат прямую под углом $\varphi(\omega)$ и откладывают на прямой отрезок, равный $M(\omega)$. Концы отрезков прямых, проведенных для разных частот, соединяют плавной кривой и таким образом получают АФЧХ звена. На АФЧХ проводят стрелку, указывающую направление движения вдоль кривой АФЧХ, соответствующее увеличению частоты колебаний. АФЧХ аperiodического ТЗ представляет собой полуокружность в IV квадранте комплексной плоскости (рис. 2.12,в).

Колебательное ТЗ. Дифференциальное уравнение (2.6) колебательного ТЗ, записанное в операторной форме, имеет вид:

$$(T^2 s^2 + 2T\zeta s + 1)\tilde{x}_{\text{вых}} = k\tilde{x}_{\text{вх}}.$$

Передаточная и частотные функции определяются соотношениями

$$W(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2T\zeta \cdot s + 1};$$

$$W(j\omega) = \frac{k}{(1 - T^2 \omega^2) + j2T\zeta \omega}. \quad (2.35)$$

Модуль и аргумент частотной функции, полученные из выражения (2.35), имеют вид:

$$M(\omega) = \frac{k}{\sqrt{(1 - T^2 \omega^2)^2 + (2T\zeta \omega)^2}}, \quad (2.36)$$

$$\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}\left(-\frac{2T\zeta\omega}{1-T^2\omega^2}\right). \quad (2.37)$$

При значениях коэффициента демпфирования $0 < \zeta < 1$ колебательное ТЗ представляет собой резонансную кривую (рис. 2.13,а).

Резонансная частота колебаний определяется по формуле

$$\omega_p = \frac{\sqrt{1-2\zeta^2}}{T}.$$

При $\zeta \geq 1$ АЧХ колебательного ТЗ представляет собой кривую, похожую на АЧХ аperiodического ТЗ. С увеличением частоты колебаний $\omega \rightarrow \infty$ амплитуда колебаний на выходе из колебательного ТЗ стремится к нулю, а фаза выходного сигнала будет отставать от фазы входного на угол $-\pi$ (рис. 2.13,б). В консервативном колебательном ТЗ ($\zeta = 0$) на ω_p происходит резкая смена фазы выходного сигнала на угол $-\pi$. АФЧХ колебательного ТЗ располагается в IV и III квадрантах комплексной плоскости – как показано на рис. 2.13,в.

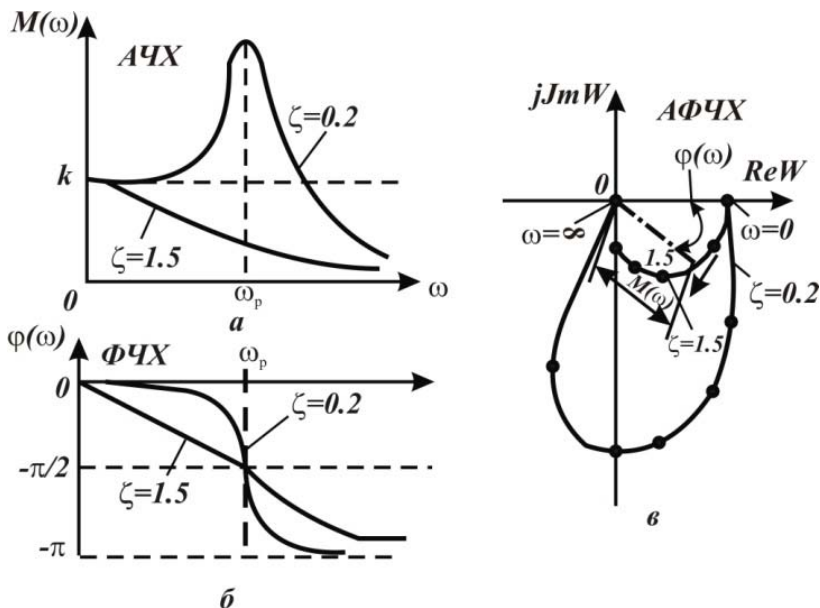


Рис. 2.13. Частотные характеристики колебательного типового звена

Реальное дифференцирующее ТЗ. Операторное уравнение реального дифференцирующего ТЗ в соответствии с формулой (2.14) имеет вид:

$$(Ts + 1)\tilde{x}_{\text{вых}} = kTs\tilde{x}_{\text{вх}}.$$

Передаточная и частотная функции определяются равенствами

$$W(s) = \frac{kTs}{Ts + 1},$$

$$W(j\omega) = \frac{jkT\omega}{1 + jT\omega}. \quad (2.38)$$

АЧХ и ФЧХ, определенные из соотношения (2.38), имеют вид:

$$M(\omega) = \frac{kT\omega}{\sqrt{1 + T^2\omega^2}}, \quad (2.39)$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{1}{T\omega}. \quad (2.40)$$

АЧХ реального дифференцирующего звена (рис. 2.14,а) имеет вид нарастающей кривой, что указывает на то, что это звено обладает свойством фильтра высоких частот: хорошо пропускает колебания

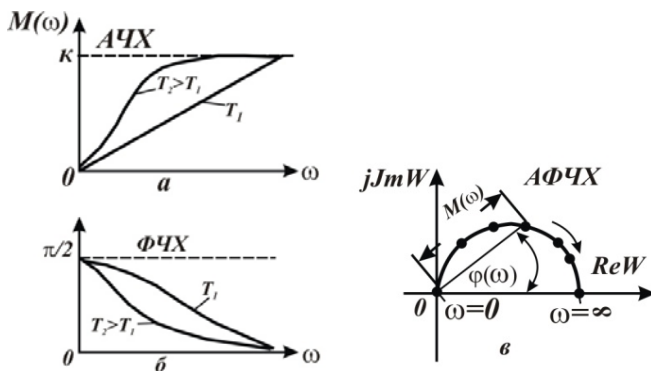


Рис. 2.14. Частотные характеристики реального дифференцирующего типового звена

высоких частот и плохо – колебания низких частот. Сдвиг по фазе $(\varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}})$ при изменении частоты колебаний от нуля до бесконечности уменьшается от $\pi / 2$ до нуля (рис. 2.14,б).

АФЧХ реального ТЗ представляет собой полуокружность, расположенную в первом квадранте (рис. 2.14,в).

Интегрирующее ТЗ. Операторное уравнение интегрирующего ТЗ в соответствии с уравнением (2.15) имеет вид:

$$s\tilde{x}_{\text{вых}} = k\tilde{x}_{\text{вх}}.$$

Передаточная и частотная функции определяются выражениями

$$W(s) = \frac{k}{s};$$

$$W(j\omega) = -j \frac{k}{\omega}. \quad (2.41)$$

АЧХ и ФЧХ интегрирующего звена строятся в соответствии с выражениями

$$M(\omega) = \frac{k}{\omega}; \quad (2.42)$$

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \left(\frac{\frac{k}{\omega}}{0} \right) = -\frac{\pi}{2}. \quad (2.43)$$

Как следует из формулы (2.42), АЧХ интегрирующего звена представляет собой гиперболу (рис. 2.15,а). Чем выше частота колебаний, тем меньше амплитуда колебаний выходного сигнала.

При $\omega=0$ амплитуда выходного сигнала равна бесконечности. Начальная фаза выходных колебаний отстает от начальной фазы входных колебаний на угол $-\pi / 2$ и не зависит от частоты колебаний (рис. 2.15,б). АФЧХ интегрирующего ТЗ совпадает с отрицательной частью оси ординат (рис. 2.15,в). Точка, соответствующая $\omega = \infty$, расположена в начале координат.

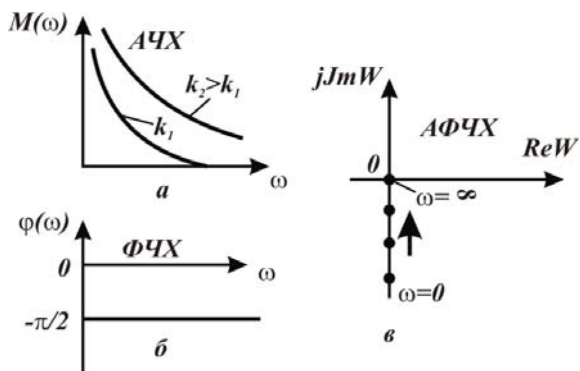


Рис. 2.15. Частотные характеристики интегрирующего типового звена

2.4 Выполнение лабораторных работ по исследованию характеристик типовых динамических звеньев

Целью лабораторных работ является закрепление теоретического материала по характеристикам основных типовых звеньев:

- апериодического;
- колебательного;
- дифференцирующего (реального);
- интегрирующего.

Для удобства выполнения работ на диске D в папке «САНЧУ-ГОВ» размещены модели исследуемых звеньев. Пример открываемой модели приведен на рис. 2.16.

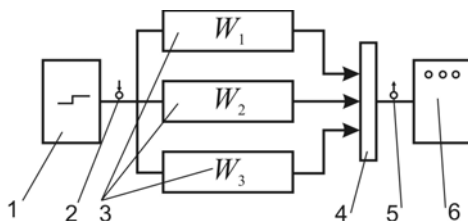


Рис. 2.16. Вид отрываемой модели:

1 – источник внешнего возмущения; 2 – символ входного сигнала (input Points) для линейного анализа; 3 – три модели исследуемого типового звена со своими передаточными функциями W_1 , W_2 , W_3 ; 4 – объединяющая шина с параллельными входами; 5 – символ выходного сигнала (Aut Points) для линейного анализа; 6 – осциллограф-регистратор

Студент исследует характеристики типовых звеньев с заданными индивидуальными коэффициентами для систем:

- электрической;
- гидравлической;
- пневматической.

В процессе выполнения задания исследуются переходные характеристики типовых динамических звеньев (лабораторная работа № 1) и частотные характеристики (лабораторная работа № 2).

Работа №1 выполняется в следующей последовательности:

1. После активации исследуемого звена убедиться в том, что на вашем компьютере установлена версия ПО MatLab_Simulink R2012b.
2. В открывшихся моделях необходимо установить численные значения коэффициентов уравнений звеньев, заданных преподавателем. Для этого необходимо выделить нужную модель звена двойным нажатием мыши, в появившемся окне параметров установить значения коэффициентов числителя (Numerator) и знаменателя (Denominator). Они задают вид передаточной функции модели.
3. Для получения нужных результатов необходимо выполнить несколько расчетов, суть которых заключается в следующем. Для анализа влияния одного из параметров звена необходимо во всех трех моделях зафиксировать заданные преподавателем значения параметров кроме одного, значения которого необходимо поменять в интересующих студента пределах.
4. Нажать на кнопку запуск моделирования на панели инструментов и дважды щелкнуть на модели осциллографа. Скомпоновать на экране расположение размеров модели и результатов расчетов.
5. Провести настройку единиц измерения. Для этого перейти во вкладку FIGURES, выбрать меню Current plot properfies. В появившемся окне Property Editor открыть вкладку Units и установить следующие значения:
 - **Frequency: Hz**
 - **Magnitude: absolute.**

Изменить цвета графиков. Для этого открыть настройки осциллографа и перейти во вкладку **Styles**. Во вкладке выбрать желаемые

мые цвета поля графиков, надписи по осям и самих полученных кривых.

6. Использовать полученные графики для отчета по лабораторной работе. Для этого клавишей PrtSc сохранить полученные графики на персональной Флеш-карте.
7. Провести необходимые расчеты со всеми видами типовых звеньев.
8. Проанализировать полученные результаты. При этом необходимо обратить внимание на следующее:
 - на вид переходной характеристики;
 - на величину изменения амплитуды выходного сигнала в процессе переходного процесса.

С использованием линейки и карандаша выполнить и нанести на графики методы графического определения параметров типовых звеньев (T и K).

По каждому выполненному расчету авторучкой написать выводы о характере переходного процесса, особенностях и параметрах его протекания.

Работа №2 выполняется в следующей последовательности:

1. После активации каждой модели установить заданные параметры звена. После этого необходимо расставить точки приложения входного воздействия и выходного сигнала при проведении расчетов характеристик. Для этого включить функцию Linearizations Points (входной порт). Аналогичным образом активировать выходную линию связи и выходной порт (Out Points).
2. Нажать кнопку Analysis, Control Design, Linear Analysis. В выпадающем окне конфигурации результатов (Plot Result) выбрать частотные характеристики New Bode. Включить моделирование.
На экране монитора появляется три пары графиков амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик.
3. Для получения более точного результата подвести курсор мыши на интегрирующую точку графика и щелкнуть ле-

вой клавишей. В выпадающем окне появится необходимая информация о значении параметра в данной точке.

4. Провести настройку единиц измерения полученных результатов. Для этого перейти во вкладку Figures, выбрать меню Current Plot Properties. В появившемся окне открыть вкладку Units и установить следующие размерности:
 - **Frequency: Hz**
 - **Magnitude: absolute**
 - **Phase: degrees.**

Отчеты по лабораторным работам № 1 и № 2 должны содержать:

- уравнения и аналитические записи характеристик типовых звеньев;
- выводы по результатам расчета каждой характеристики четырех типовых звеньев.

3 СВОЙСТВА ГТД КАК ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЕ ГАЗОВ ПЕРЕД ТУРБИНОЙ

Основные характеристики двигателя $n = f(G_T), T_2^* = f(G_T)$ на установившихся режимах определяются в соответствии с теорией рабочего процесса ГТД. Однако на переменных режимах работы двигателя (разгон, сброс газа) они в значительной мере видоизменяются. Исследование характеристик ГТД на неустановившихся режимах является одной из основных задач теории автоматического управления.

Основной характеристикой двигателя, которая используется при проектировании системы управления, является зависимость, связывающая управляемые параметры и управляющие воздействия при изменении внешних воздействий, т.е. $РП = f(PФ, ВВ, t)$.

3.1 Газотурбинный двигатель как объект управления по частоте вращения

Система автоматического управления двигателя состоит из объекта регулирования (собственно двигателя) и регулятора. Проектирование регулятора проводится исходя из удовлетворения требований к САУ с учетом характеристик конкретного двигателя как объекта регулирования. Современный авиационный двигатель представляет собой динамическую систему, точное определение свойств которой является достаточно сложной задачей. При проектировочных расчетах часто бывает достаточно учесть лишь основные динамические свойства двигателя, анализ которых приведен в данном разделе пособия.

Основной характеристикой двигателя, которая используется при проектировании регуляторов, является зависимость, связывающая РП и РФ при изменении внешних воздействий, т.е. $РП = f(PФ, ВВ, t)$, например, для одновального ГТД с нере-

гулируемым соплом эта зависимость запишется так:
 $n = f(G_T, F_C, p_H, p_B^*, T_B^*, t)$ [9].

Рассмотрим вывод уравнения динамики ГТД как объекта управления с использованием моментных характеристик узлов.

При выводе уравнения динамики ГТД учет многих факторов приводит к усложнению расчетной модели, поэтому принимается ряд допущений: влияние объемов в проточной части двигателя на его динамические свойства – незначительное; преобразование энергии в камере сгорания происходит мгновенно; КПД узлов двигателя – неизменны; в сопловом аппарате турбины реализуется критический и сверхкритический режимы истечения; потери мощности на привод агрегатов и трение малы по сравнению с мощностью, развиваемой турбиной; изменения параметров рабочего процесса относительно установившихся их значений – малые.

Для неустановившегося режима работы уравнение баланса моментов или уравнение движения ротора двигателя имеет вид:

$$(\pi / 30) J (dn / dt) = M_T(n, G_T) - M_K(n), \quad (3.1)$$

где J – полярный момент инерции ротора.

Уравнение (3.1) является нелинейным. Одним из часто применяемых методов линеаризации является метод малых отклонений, заключающийся в разложении нелинейной функции в ряд Тейлора с удержанием первых членов ряда. Преимуществом этого метода является возможность получения простых аналитических зависимостей, наглядность влияния параметров рабочего процесса двигателя на его динамические свойства. Раскладывая зависимости для $M_T(n, G_T)$ и $M_K(n)$ в ряд Тейлора в окрестности установившегося режима $(n_0, (G_T)_0)$ и ограничиваясь первыми членами разложения, можно записать

$$M_T(n, G_T) = (M_T)_0 + (\partial M_T / \partial n)_0 \cdot \Delta n + (\partial M_T / \partial G_T)_0 \cdot \Delta G_T,$$

$$M_K(n) = (M_K)_0 + (dM_K / dn)_0 \cdot \Delta n, \quad (3.2)$$

где $\Delta n = n - n_0$, $\Delta G_T = G_T - (G_T)_0$ – отклонения частоты вращения и расхода топлива от их установившихся значений. Производные

$(\partial M_T / \partial n)_0$ и $(dM_K / dn)_0$ определяются по углам наклона касательных к моментным характеристикам турбины и компрессора в точках их пересечения, соответствующих установившимся режимам 1, 2, 3 при $G_T = \text{const}$: $(G_T)_1 \geq (G_T)_2 \geq (G_T)_3$ (рис. 3.1). Геометрическое место точек указанных пересечений дает статическую моментную характеристику турбокомпрессора по частоте вращения. Частная производная $(\partial M_T / \partial G_T)_0$ определяется по углу наклона касательной к статической характеристике $M_T(G_T)$ (рис. 3.2).

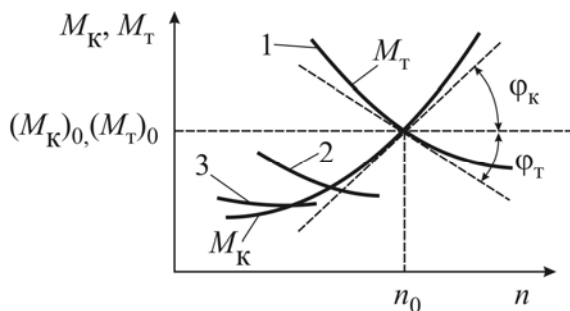


Рис. 3.1. Моментные характеристики компрессора и турбины ГТД при различных значениях n и G_T

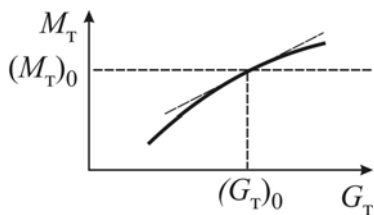


Рис. 3.2. Моментная характеристика турбины в зависимости от расхода топлива

Уравнение (3.2) записано в предположении постоянства внешних условий. Подставляя выражение (3.2) в уравнение (3.1) с учетом того, что $(M_T)_0 = (M_K)_0$ и $n = n_0 + \Delta n$, получим:

$$\frac{\pi}{30} J \frac{d\Delta n}{dt} + \left[\left(\frac{dM_K}{dn} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0 \right] \Delta n = \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 \Delta G_T. \quad (3.3)$$

Уравнение (3.3) является линеаризованным дифференциальным уравнением динамики ГТД как объекта управления при постоянных внешних условиях.

Для общности анализа уравнения (3.3) записывают в безразмерных параметрах: $\delta n = \Delta n / n_{\delta аз}$; $\delta G = \Delta G_T / (G_T)_{\delta аз}$. За базовые значения $n_{\delta аз}$ и $(G_T)_{\delta аз}$ принимают обычно либо их установившиеся значения n_0 и $(G_T)_0$, либо n_{\max} и $(G_T)_{\max}$. С учетом введения безразмерных параметров уравнение (3.3) можно привести к следующей стандартной форме:

$$T_D \frac{d\delta n}{dt} + \delta n = K_{nG} \delta G_T. \quad (3.4)$$

Здесь

$$T_D = \frac{J \frac{\pi}{30}}{\left(\frac{dM_K}{dn} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0} \quad (3.5)$$

– постоянная времени двигателя;

$$K_{nG} = \left\{ \left(\frac{\partial M_T}{\partial G_T} \right)_0 / \left[\left(\frac{dM_K}{dn} \right)_0 - \left(\frac{\partial M_T}{\partial n} \right)_0 \right] \right\} \frac{(G_T)_{\delta аз}}{n_{\delta аз}} \quad (3.6)$$

– коэффициент усиления двигателя по расходу топлива. Величину $1/K_{nG} = \rho_c$ называют коэффициентом самовыравнивания двигателя, так как эта величина характеризует степень устойчивости двигателя как объекта регулирования. Чем больше ρ_c , тем двигатель более устойчив, при $\rho_c \leq 0$ двигатель как объект регулирования является неустойчивым. Коэффициент усиления двигателя определяется также по его дроссельной характеристике (рис. 3.3):

$$K_{nG} = \left(\frac{\partial n}{\partial G_T} \right)_0 \frac{(G_T)_{\delta аз}}{n_{\delta аз}}, \quad (3.7)$$

где $\left(\frac{\partial n}{\partial G_T}\right)_0 = \frac{1}{\operatorname{tg}\varphi}$ – частная производная, определяемая по углу наклона касательной к дроссельной характеристике в точке, соответствующей установившемуся режиму. Постоянная времени T_D и коэффициент усиления K_{nG} являются основными параметрами, характеризующими двигатель как объект управления. Постоянная времени T_D характеризует скорость изменения частоты вращения ротора двигателя при увеличении или уменьшении расхода топлива.

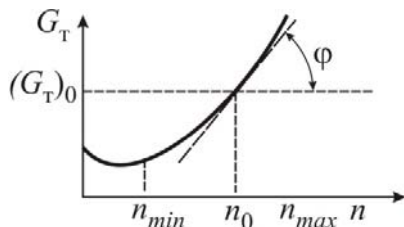


Рис. 3.3. Дроссельная характеристика ГТД

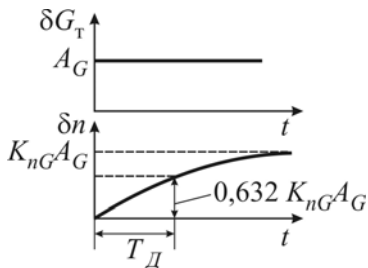


Рис. 3.4. Переходная характеристика ГТД при ступенчатом увеличении расхода топлива

Коэффициент усиления K_{nG} показывает, насколько изменится частота вращения n при изменении расхода топлива по окончании переходного процесса, т.е. при $t \rightarrow \infty$.

Из дифференциального уравнения (3.4) следует, что ГТД как объект регулирования является апериодическим типовым звеном с передаточной функцией:

$$W_{nG(S)} = \frac{K_{nG}}{T_D S + 1}. \quad (3.8)$$

При ступенчатом увеличении расхода топлива на величину A_G (рис. 3.4) частота вращения ротора двигателя изменится в соответствии с зависимостью

$$\delta n(t) = A_G \cdot K_{nG} (1 - e^{-t/T_D}). \quad (3.9)$$

Величины T_D и K_{nG} зависят от многих факторов: габаритов и режима работы двигателя, внешних условий. Рассмотрим их влияние на переходные характеристики.

3.1.1 Влияние размеров двигателя

Рассмотрим влияние геометрических размеров двигателя на постоянную времени T_D и коэффициент усиления K_{nG} при постоянных значениях T_G^*, π^* . Момент инерции ротора двигателя пропорционален четвертой степени диаметра, а расход воздуха – только его квадрату. Чем больше расход воздуха через двигатель, тем больше избыточный момент на турбокомпрессоре, т.е. больше $\left[(dM_K / dn)_0 - (\partial M_T / \partial n)_0 \right]$. Так как с увеличением диаметральных размеров двигателя числитель в формуле (3.5) растет быстрее знаменателя, постоянная времени T_D будет увеличиваться. Для двигателя больших размеров дроссельная характеристика $G(n)$ (см. рис. 3.3) пойдет более круто, что приводит к снижению $(\partial n / \partial G_n)$, а следовательно, к уменьшению K_{nG} . Таким образом, с увеличением поперечных размеров двигателя его постоянная времени T_D растет, а коэффициент усиления K_{nG} падает.

3.1.2 Влияние режимов работы двигателя

При изменении режима работы двигателя изменяется избыточный момент на турбокомпрессоре, характеризующийся углом между

касательными к моментным характеристикам $M_T(n)$ и $M_K(n)$ или разностью $(dM_K/dn)_0 - (\partial M_T/\partial n)_0$. Из рис. 3.1 следует, что с понижением режима работы двигателя разность $(dM_K/dn)_0 - (\partial M_T/\partial n)_0$ уменьшается. Это означает, что по мере дросселирования двигателя постоянная времени T_D увеличивается. При достижении $n = n_{zp}$ разность частных производных $(dM_K/dn)_0 - (\partial M_T/\partial n)_0$ равна нулю и $T_D = \infty$, а при $n \leq n_{zp}$ эта разность отрицательна, что соответствует $T_D \leq 0$. Частота вращения $n = n_{zp}$ является граничной частотой, выше которой ТРД является устойчивым объектом регулирования, а ниже – неустойчивым. Действительно, при $n < n_{zp}$ незначительное отклонение от установившегося режима в сторону уменьшения n приводит к тому, что момент противодействия компрессора становится больше момента, развиваемого турбиной, и частота вращения уменьшается до остановки двигателя. При $n > n_{zp}$ отклонение n от установившегося режима в сторону ее уменьшения приводит к тому, что момент, развиваемый турбиной, становится больше момента противодействия компрессора и частота вращения восстанавливается до исходного (до отклонения) установившегося значения. Аналогичный анализ относительно коэффициента усиления двигателя показывает, что по мере дросселирования двигателя K_{nG} растет (рис. 3.5).

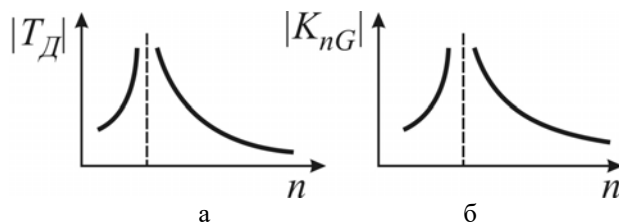


Рис. 3.5. Зависимость постоянной времени двигателя (а) и коэффициента усиления (б) от частоты вращения

Это связано с тем, что знаменатель формулы (3.6) уменьшается по частоте вращения двигателя быстрее, чем числитель. Увеличение K_{nG} по мере дросселирования двигателя можно проследить и по

дроссельной характеристике (см. рис. 3.3 и формулу (3.7)). Из проведенного анализа следует, что при $n < n_{cp}$ двигатель в принципе не может работать без регулятора, а при $n > n_{cp}$ может работать и без регулятора. Однако учитывая, что режим работы двигателя отклоняется при изменении внешних условий, необходимо установить регулятор, который должен работать во всем диапазоне изменения частоты вращения. Кроме того, двигатель выполняют таким, что $n_{мz} > n_{cp}$, и граничную частоту двигатель проходит в момент запуска, т.е. раскрутки ротора стартером. Постоянная времени T_D и коэффициент усиления K_{nG} двигателя также зависят и от внешних условий, что необходимо учитывать при разработке регулятора.

3.1.3 Влияние внешних условий

Если известны $(T_D)_0$ и $(K_{nG})_0$ при $H = 0$, $M_{II} = 0$, то пользуясь формулами подобия, можно определить приближенно значения T_D и K_{nG} при различных значениях T_B^* и P_B^* , т.е. при различных высотах и скоростях полета. При $n_{np} = \text{const}$ справедливы следующие формулы:

$$T_D = (T_D)_{np} \frac{101320}{P_B^*} \sqrt{\frac{T_B^*}{288}}, \quad (3.10)$$

$$K_{nG} = (K_{nG})_{np} \frac{101320}{P_B^*}. \quad (3.11)$$

При известных зависимостях P_B^* , T_B^* от высоты и скорости полета, а также зависимостях $T_D(n)$, $K_{nG}(n)$ при стандартных атмосферных условиях можно построить кривые T_D и K_{nG} в функции от H и M_{II} (рис. 3.6, а, б). Из графиков рис. 3.6, а, б следует, что чем больше высота и меньше скорость полета, тем больше T_D и K_{nG} .

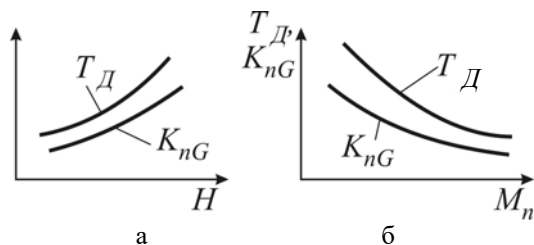
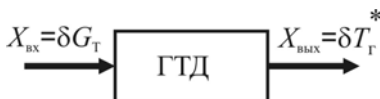


Рис. 3.6. Зависимость постоянной времени и коэффициента усиления двигателя от высоты (а) и скорости (б) полета при $n = \text{const}$

Двигатель как объект управления обладает наихудшими динамическими свойствами на пониженных режимах работы, больших высотах и малых скоростях полета. При стандартных условиях на максимальном режиме $T_D = 0,4 \dots 1$ с, $K_{nG} = 0,2 \dots 0,4$, а на режиме МГ $T_D = 8 \dots 20$ с, $K_{nG} = 1,5 \dots 2$. Наименьшее значение T_D , K_{nG} при стандартных условиях и наибольшие значения на большой высоте и малой скорости полета отличаются в 20...30 раз. Поэтому трудно создавать всережимные САУ двигателя.

3.2 Динамические свойства ГТД как объекта управления по температуре газов T_G^*

В данном случае структурная схема ГТД имеет вид:



Учитывая принятое ранее допущение о безынерционности процессов в камере сгорания и имея в виду, что существует определенная связь между расходом воздуха G_B и частотой вращения ротора, можно представить уравнения для камеры сгорания при малых отклонениях в следующем виде:

$$\delta T_G^* = K_{TG} \cdot \delta G_T + K_{Tn} \cdot \delta n, \quad (3.12)$$

где $K_{TG} = \left(\frac{\partial T_{\Gamma}^*}{\partial G_T} \right)_0 \cdot \frac{G_{T_{\delta аз}}}{T_{\Gamma_{\delta аз}}^*}$ – коэффициент усиления камеры сгорания

двигателя по расходу топлива;

$$K_{Tn} = \left(\frac{\partial T_{\Gamma}^*}{\partial n} \right)_0 \cdot \frac{\delta n_{T_{\delta аз}}}{T_{\Gamma_{\delta аз}}^*} \text{ – коэффициент усиления камеры сгорания}$$

двигателя по частоте вращения.

Для получения уравнения ГТД как объекта управления по T_{Γ}^* необходимо решить совместно уравнения двигателя как объекта управления по частоте вращения:

$$T_D \frac{d\delta n}{dt} + \delta n = K_{nG} \delta G_T$$

и камеры сгорания ГТД:

$$\delta T_{\Gamma}^* = K_{TG} \cdot \delta G_T + K_{Tn} \cdot \delta n.$$

Из совместного решения этих уравнений, освобождаясь от δn , получим

$$T_D \frac{d\delta T_{\Gamma}^*}{dt} + \delta T_{\Gamma}^* = T_D K_{TG} \frac{d\delta G_T}{dt} + (K_{TG} + K_{Tn} K_{nG}) \delta G_T. \quad (3.13)$$

Передаточная функция ГТД в соответствии с уравнением (3.13) примет вид:

$$W(s)_{TG} = \frac{\tilde{\delta T}_{\Gamma}^*}{\tilde{\delta G}_T} = \frac{T_D K_{TG} s}{T_D s + 1} + \frac{K_{TG} + K_{Tn} K_{nG}}{T_D s + 1}. \quad (3.14)$$

Структурная схема ГТД как объекта управления по T_{Γ}^* представляет собой параллельное соединение реально дифференцирующего и апериодического звеньев (рис. 3.7).

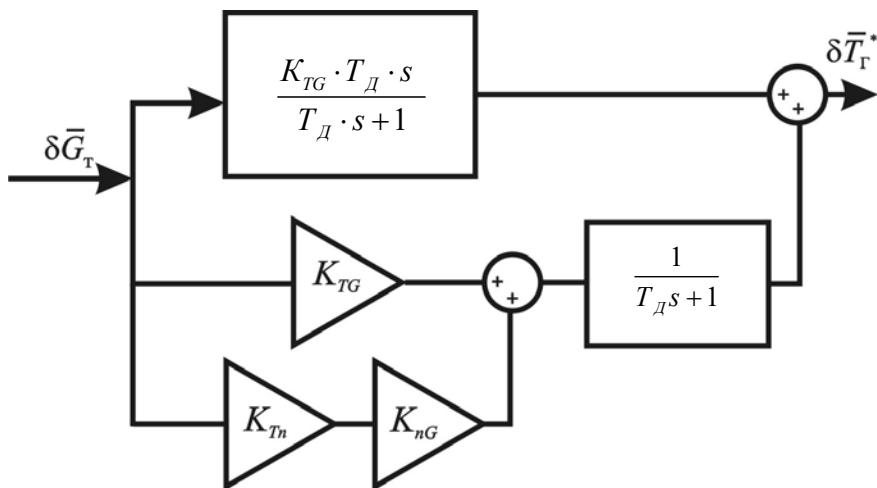


Рис. 3.7. Структурная схема ГТД как объекта управления по T_T^*

При ступенчатом увеличении δG_T уменьшается коэффициент избытка воздуха, что приводит к резкому (скачкообразному) росту T_T^* . По мере увеличения n увеличивается расход воздуха G_B и температура газов T_T^* снижается до уровня нового установившегося режима. Величина скачка температуры T_T^* , направление и скорость ее последующего изменения и конечное установившееся значение определяются свойствами двигателя на различных режимах работы и внешними условиями.

Для этого рассмотрим изменения расходов топлива G_T и температуры газов T_T^* на различных установившихся режимах работы двигателя (рис. 3.8).

Кривые показывают, что с увеличением режима работы двигателя потребный расход топлива непрерывно растет, а температура газа перед турбиной вначале падает (за счет повышения η ступеней) и только потом начинает расти.

Поэтому, если увеличение расхода топлива происходит в области А, заброс температуры будет максимальным, а затем за счет

раскрутки ротора температура установится на значениях ниже исходного (рис. 3.9).

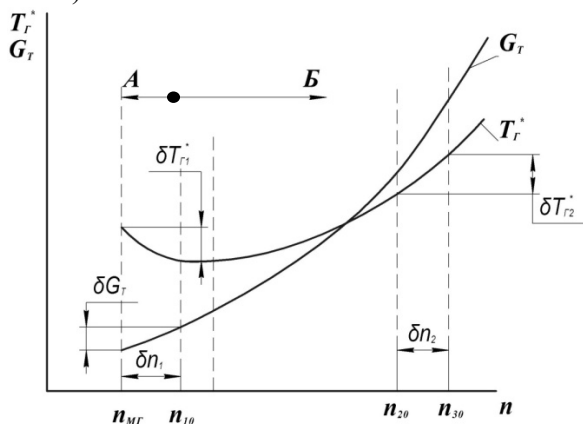


Рис. 3.8. Кривые изменения температуры газов T_g^* и потребных расходов топлива G_T на установившихся режимах работы двигателя

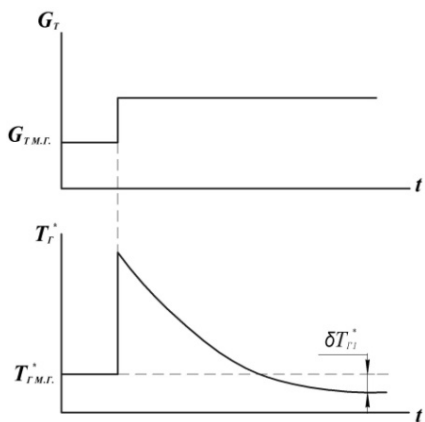


Рис. 3.9. Переходная характеристика ТРД $T_g^* = T_g^*(G_T)$

Если исходный режим находится в области Б (см. рис. 3.8), где с увеличением расхода топлива наблюдается повышение температуры T_g^* , ее конечные значения будут выше исходного. Величина скачкообразного роста температуры T_g^* будет уменьшаться с увеличением режима работы двигателя (3.10).

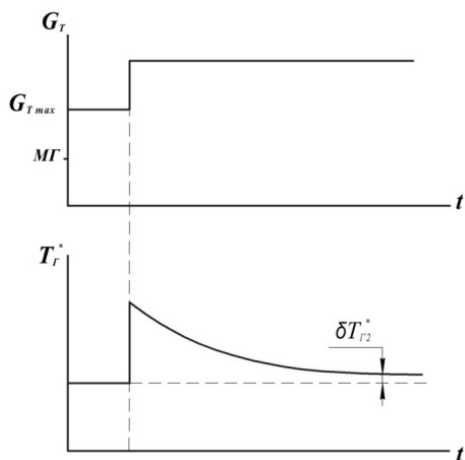


Рис. 3.10. Изменение расхода топлива и температуры газов на средних режимах работы двигателя

И, наконец, если исходный режим ГТД находится вблизи максимального, то скачок температуры газов будет минимальным, но в дальнейшем температура газов по мере увеличения частоты вращения будет увеличиваться. Объясняется это тем, что незначительное увеличение частоты вращения вызывает большие изменения π_{κ}^* и дополнительный нагрев воздуха в компрессоре (рис. 3.11).

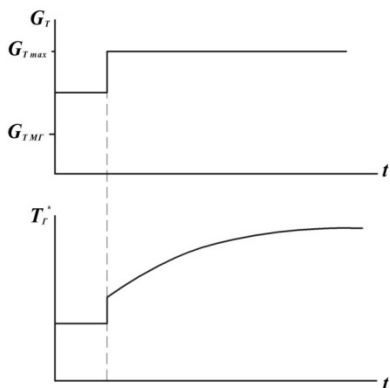


Рис. 3.11. Изменения расхода топлива и температуры на максимальных режимах работы двигателя

3.3 Выполнение лабораторных исследований по оценке динамических характеристик ГТД

При изучении влияния размеров двигателя, режимов его работы и внешних условий (высоты и скорости полета) используются модели:

- ГТДп – для изучения изменения частоты вращения ротора двигателя;
- ГТДТ – для изучения изменения температуры газа перед турбиной.

Указанные модели размещены в папке «Свойства ГТД как объекта управления».

При открытии модели ГТДп на мониторе появляется схема, представленная на рис. 3.12.

Она состоит из трех частей.

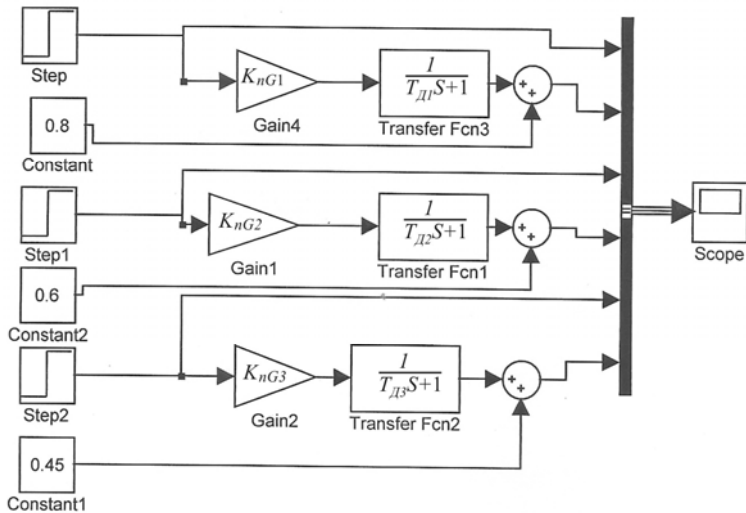


Рис.3.12. Структурная модель расчета переходных процессов изменения частоты вращений двигателя

Верхняя часть модели (блоки Gain4 – Transfer Fcn3) отражает изменение частоты вращения ротора на высоких режимах работы двигателя.

Средняя часть отражает изменение частоты вращения на средних, крейсерских режимах. И нижняя часть соответствует изменению режима на малых режимах работы двигателя.

На осциллографе Score попарно отражаются параметры входного возмущения, действующего на двигатель, и изменение частоты вращения ротора двигателя при данном возмущении.

Настройки источников возмущения представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. **Настройки источников возмущения**

Блоки	Параметры			
	Начало скачка, с	Начальный уровень скачка, %	Конечный уровень скачка, %	Частота опроса, с
Step	0,2	0,8	0,9	0,01
Step1	0,2	0,6	0,7	0,01
Step2	0,2	0,45	0,55	0,01

Для увеличения наглядности на экран осциллографа выводятся представленные в таблице параметры блоков нагружения. Также для увеличения наглядности результаты расчетов смещаются с использованием блоков Constant на величину исходного уровня работы двигателя. Исходными данными для проведения расчетов являются заданные преподавателем коэффициенты $T_{Д\text{ зад}}$ и $K_{nG\text{ зад}}$, определяющие модель ГТД как объекта управления. Эти коэффициенты определяют модель ГТД, работающего на максимальном режиме, на максимальной скорости и высоте полета.

Для проведения исследований по графикам рис. 3.13-3.15 требуется определить расчетные значения коэффициентов, которые необходимо вставить в модель. При этом расчетные значения коэффициентов, устанавливаемые в модели, определяются следующим образом:

$$T_{Д\text{ расч}} = T_{Д\text{ зад}} \cdot \bar{T},$$

$$K_{nG\text{ расч}} = K_{nG\text{ зад}} \cdot \bar{K},$$

где \bar{T} и \bar{K} – относительные значения коэффициентов, определяемые по графикам рис. 3.13 – 3.15.

При открытии модели ГТДТ на мониторе появляются схема, представленная на рис. 3.16.

Модель реализует структурную схему ГТД как объекта управления по температуре газов перед турбиной, представленную на рис. 3.7. Отличие модели от рассмотренной ранее заключается в том, что сигналы входных возмущений выводятся на отдельный осциллограф Scope1.

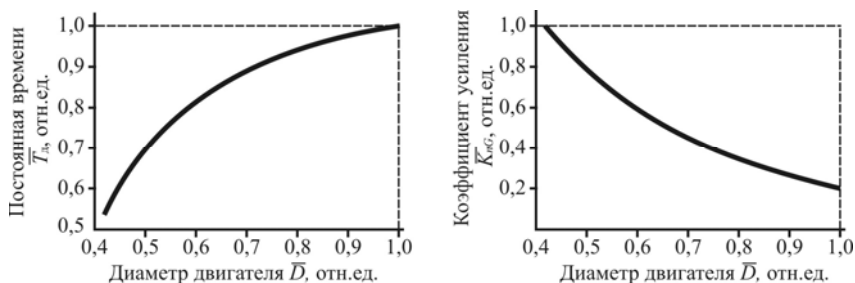


Рис. 3.13. Влияние диаметра двигателя \bar{D} на коэффициенты T_D и K_{nG}

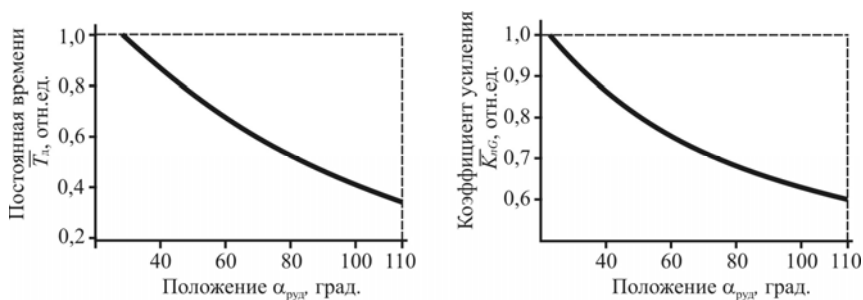


Рис. 3.14. Влияние режима работы двигателя на коэффициенты T_D и K_{nG}

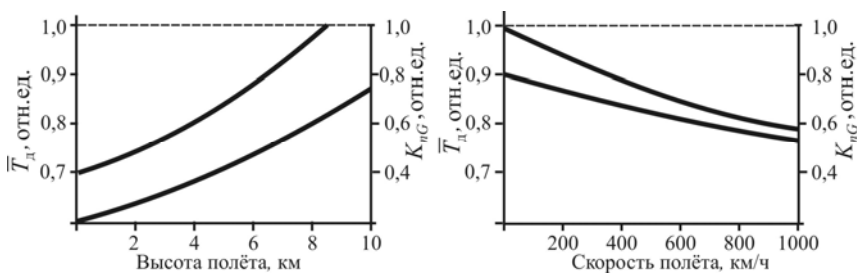


Рис. 3.15. Влияние режима полета на коэффициенты T_D и K_{nG}

Она также состоит из трех частей, отражающих работу двигателя на описанных выше трех режимах (близкого к номинальному, крейсерскому режиму и режиму, близкому к режиму малого газа).

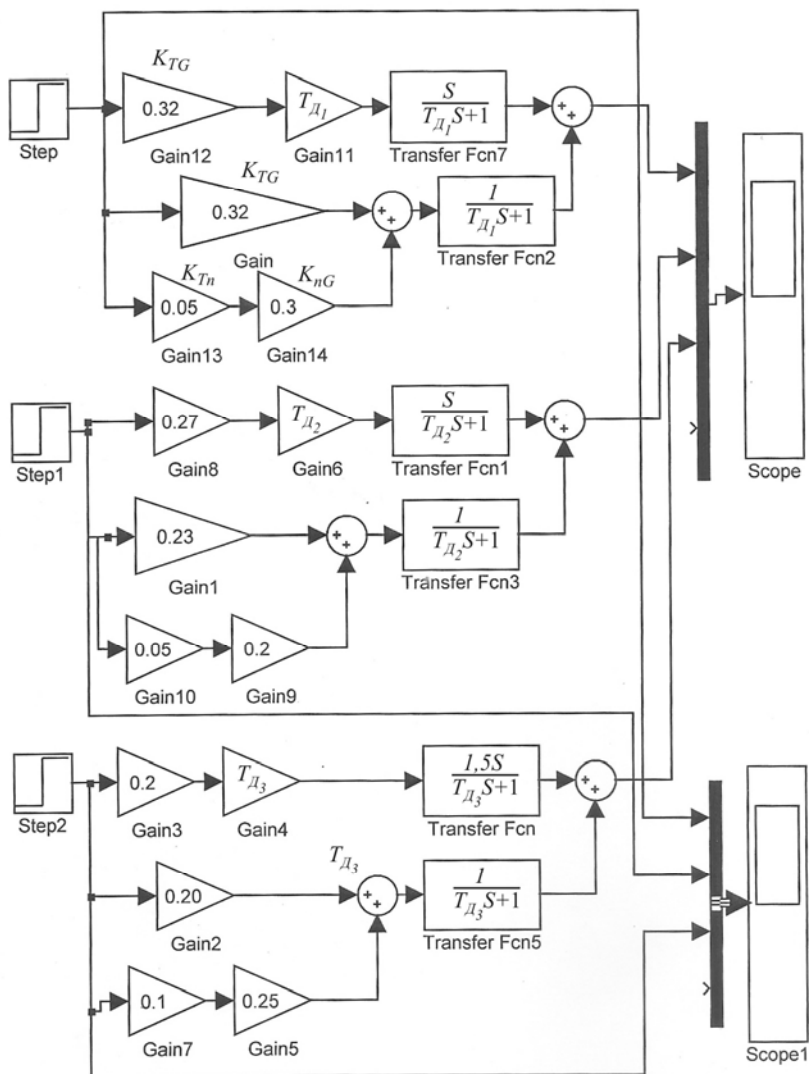


Рис. 3.16. Структурная модель расчета переходных процессов изменения температуры газов перед турбиной двигателя T_{Γ}^*

Порядок проведения занятия

1. После определения расчетных значений коэффициентов двигателя необходимо открыть в папке модель ГТДп и выполнить 4 серии расчетов переходных процессов изменения частоты вращения ротора. Это расчеты при изменении диаметров двигателя, при изменении режимов работы и внешних условий полета.

При этом следует учесть, что исследования влияния размеров двигателя, внешних условий полета проводятся при одинаковых уровнях входного возмущения. Для этого можно отключить от осциллографа выходные сигналы двух моделей и провести три расчета на одной модели, изменяя каждый раз коэффициенты T_d и K_{nG} . Либо отключить два входных сигнала возмущения, а оставшийся блок Step подключить на вход оставшихся моделей.

Сделать выводы об особенностях работы и управления двигателем в различных условиях.

2. Выполнение расчетов переходных процессов изменения температуры газов перед турбиной проводится на модели ГТДТ (3.13). Модель реализует структурную схему, представленную на рис. 3.7. Аналогично представленной выше методике расчета частоты вращения ротора расчеты проводятся при изменении коэффициентов T_d и K_{nG} .

Значение остальных коэффициентов модели не изменяется.

3. Заключительный этап занятия – анализ полученных результатов. На поле каждого выполненного расчета необходимо авторучкой описать анализ расчетов с указанием численных результатов (результатов графического определения постоянных времени и коэффициентов усиления).

Отчет должен содержать:

- теоретическую часть оценки динамических характеристик двигателя;
- результаты выполненных расчетов с их анализом;
- общие выводы по работе с указанием на каких режимах, в каких условиях полета газотурбинным двигателем лучше управлять.

4 ПРИНЦИПЫ ДЕЙСТВИЯ И СТРУКТУРНЫЕ СХЕМЫ ГИДРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГТД [10]

4.1 САУ с регулятором прямого действия

Регулятором прямого действия (рис. 4.1) называется регулятор, у которого чувствительный элемент, определяющий фактическое значение частоты вращения, приводит в действие исполнительный элемент регулятора.

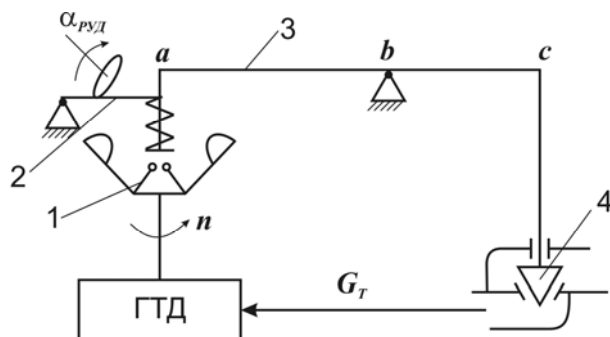


Рис. 4.1. Схема регулятора прямого действия

Регулятор состоит из чувствительного элемента 1 (датчик частоты вращения), включающего в себя центробежные грузики, размещенные на вращающейся опоре, задающего устройства 2 с поворотным кулачком-эксцентриком и рычагом, изменяющим натяжку пружины, элемента сравнения, представляющего собой рычаг 3, исполнительного устройства 4, изменяющего расход топлива.

На установившемся расчетном режиме работы двигателя центробежная сила грузиков чувствительного элемента 1 уравновешивается силой натяжки пружины, при этом рычаг 3 занимает такое положение, при котором на вход в двигатель поступает расход топлива, необходимый для работы на заданном режиме.

При изменении условий работы или внешней нагрузки (N), действующей на двигатель (например, в сторону увеличения, как это представлено на рис. 4.2), регулятор работает следующим образом: при уменьшении частоты вращения ротора (см. рис. 4.1) точка «а» смещается по схеме вниз, соответственно точка «с» – вверх.

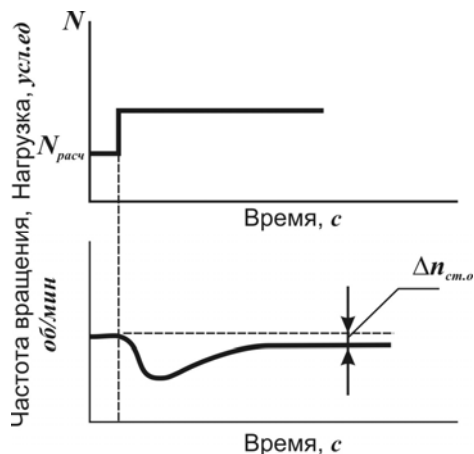


Рис. 4.2. Изменение частоты вращения двигателя при увеличении нагрузки

Расход топлива начинает увеличиваться. При этом и частота вращения ротора начнет увеличиваться. Однако этот процесс происходит с запаздыванием, обусловленным значительной инерционностью ротора ГТД. С течением времени изменение расхода топлива прекращается, переходный процесс изменения частоты вращения также заканчивается. В соответствии с нагрузочной характеристикой новой нагрузке, действующей на двигатель, соответствует новое значение расхода топлива, то есть новое положение точки «с» рычага *a-b-c*.

Это новое положение определяется новым равновесием силы пружины задатчика и фактической центробежной силой грузиков чувствительного элемента. Это равновесие наступает при новом (меньшем) значении частоты вращения, то есть при изменении нагрузки на двигатель частота вращения ротора отклоняется от исходной. Это отклонение зависит от нагрузочной характеристики двигателя, от конструктивных параметров и характеристик регулятора

(жесткости, пружины, соотношения плеч рычага $a-b-c$, геометрии топливного крана и др.). Это отклонение имеет место при любом сочетании конструктивно настроенных параметров регулятора прямого действия и носит название статической ошибки регулятора $\Delta n_{ст.о.}$.

Кроме наличия статической ошибки недостатком регулятора прямого действия является необходимость увеличения массы грузиков и, следовательно, размеров и массы всего регулятора для приведения в действие исполнительного механизма регулятора.

Достоинством регулятора прямого действия является его простота.

Для составления структурной схемы САУ с регулятором частоты прямого действия структурную схему ГТД, изученную ранее, необходимо дополнить моделью регулятора. Инерционные свойства регулятора прямого действия, принимая инерционные свойства тахометрического элемента рычага $a-b-c$ и дозирующей топливной иглы, пренебрежимо малы по сравнению с инерционностью ротора ГТД, логично описать уравнением

$$\delta G_T = K_p \delta n, \quad (4.1)$$

где K_p – коэффициент усиления регулятора при изменении частоты вращения.

Из уравнения (4.1) можно получить передаточную функцию регулятора:

$$W_p = K_p.$$

При этом структурная схема САУ частоты вращения ГТД с регулятором прямого действия имеет вид, представленный на рис. 4.3.

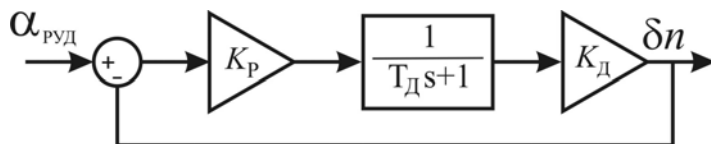


Рис. 4.3. Структурная схема САУ с регулятором прямого действия

4.2 САУ с регулятором непрямого действия

Регулятором непрямого действия (астатическим регулятором) называется регулятор, у которого чувствительный элемент воздействует на исполнительный орган с помощью специального устройства – усилителя, работающего от дополнительного источника энергии. Схема регулятора приведена на рис. 4.4.

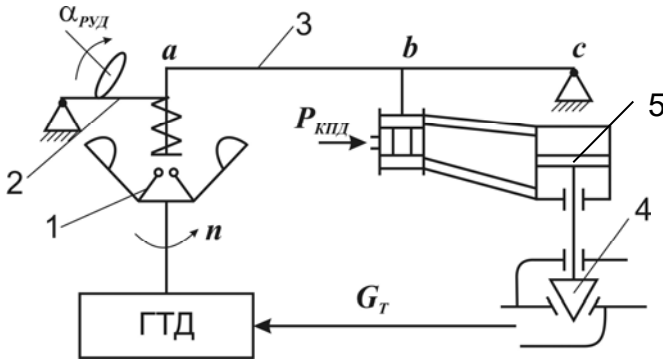


Рис. 4.4. Схема астатического регулятора непрямого действия

В отличие от регулятора прямого действия точка «с» рычага 3 закреплена неподвижно, а между точкой «b» и топливным краном 4 установлен гидравлический усилитель 5. Усилитель состоит из управляющего золотника с центральной проточкой и силового цилиндра двухстороннего действия.

На заданном установившемся режиме работы двигателя частота вращения ротора и расход топлива остаются постоянными. Это соответствует такому положению рычага 3, при котором полости силового гидроцилиндра запорты управляющим золотником.

Рассмотрим работу регулятора при увеличении нагрузки на двигатель. В этом случае частота вращения ГТД начинает уменьшаться. Точка «a» рычага 3 опускается по схеме вниз, увлекая за собой точку «b». Через центральную проточку жидкость под давлением от клапана постоянного давления $P_{кпд}$ начинает поступать в нижнюю полость силового гидроцилиндра. Из верхней полости через золотник открывается слив. Расход топлива в двигатель начинает увеличиваться. Поскольку инерционность двигателя весьма высока, рост частоты вращения двигателя происходит с запаздыванием, а

расход топлива при этом продолжает непрерывно увеличиваться. Поэтому, когда частота вращения двигателя становится равной заданному значению и точки «а» и «b» рычага становятся в положение, когда обе полости гидроцилиндра заперты, расход топлива превышает потребное значение. Поэтому частота вращения ротора ГТД продолжает увеличиваться и процесс регулирования происходит в обратном направлении – на уменьшение расхода топлива. Процесс регулирования носит затухающий колебательный характер (рис. 4.5).

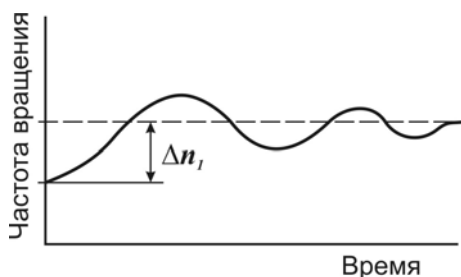


Рис. 4.5. Переходный процесс в САУ с регулятором непрямого действия при отклонении режима работы. Δn_1 – первоначальное отклонение

По окончании переходного процесса, т.е. когда частота вращения стабилизируется, статическая ошибка отсутствует. Объясняется это тем, что когда режим работы двигателя стабилизируется, расход топлива неизменен. Это, в свою очередь, происходит тогда, когда полости гидроцилиндра заперты управляющим золотником.

Но если точка «b» находится в положении заданного режима работы, то и точка «а» находится в положении заданного режима работы двигателя без статической ошибки. Поэтому регулятор такого типа называется астатическим.

Для того, чтобы получить структурную схему САУ с рассматриваемым регулятором, необходимо в САУ с регулятором прямого действия ввести структурную схему гидроусилителя. Уравнение, описывающее динамику гидроусилителя, связывает перемещение дозирующей иглы δm и перемещение точки «а» рычага a - b - c . Это уравнение и соответствующая ему передаточная функция имеют вид:

$$\frac{d\delta m}{dt} = K_{\Gamma y} \delta X_a, \quad (4.2)$$

$$W_{Гу} = \frac{K_{Гу}}{S}. \quad (4.3)$$

В этих выражениях $K_{Гу}$ – коэффициент усиления гидроусилителя, являющегося функцией геометрических и гидравлических параметров усилителя и гидросистемы.

Структурная схема САУ с астатическим регулятором непрямого действия представлена на рис. 4.6.

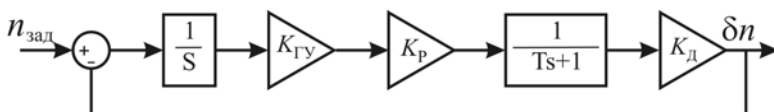


Рис. 4.6. Структурная схема САУ с астатическим регулятором непрямого действия

4.3 САУ с регулятором с жесткой обратной связью

С целью улучшения динамики работы САУ используются внутренние обратные связи в регуляторах. Внутренняя обратная связь представляет собой дополнительный канал передачи информации с выхода регулятора на его вход. Этот канал предназначен для того, чтобы информация о выполненном управляющем воздействии передавалась на вход в регулятор не дожидаясь, пока это воздействие вызовет изменение режима работы двигателя.

Обратная связь действует независимо от времени и называется **жесткой обратной связью**.

В рассматриваемой схеме регулятора жесткая связь образуется тягой, соединяющей точку «с» рычага *a-b-c* и дозирующую топливную иглу (рис. 4.7).

Регулятор работает следующим образом. При изменении внешней нагрузки (например, в сторону увеличения) точка «а» рычага *a-b-c* смещается вниз. Поскольку полости силового гидроцилиндра заперты управляющим золотником, точка «b» начинает перемещаться вниз. В нижнюю часть гидроцилиндра начинает поступать жидкость под давлением, а верхняя полость сообщается со сливом. Перемещение поршня вверх вызывает увеличение расхода топлива на входе в двигатель. Этот процесс аналогичен процессу управления в САУ с

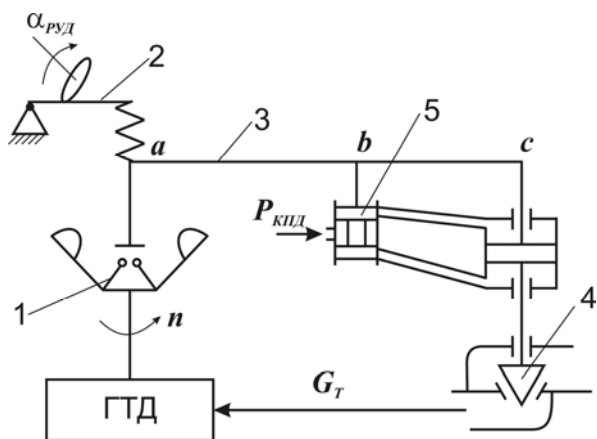


Рис. 4.7. Схема регулятора непрямого действия с жесткой обратной связью

регулятором непрямого действия, описанным выше. Но в данном случае увеличение расхода топлива вызовет соответствующее перемещение точки «с» рычага $a-b-c$ благодаря тяге обратной связи. Одновременно с увеличением расхода топлива точка «b» начнет перемещаться вверх, перекрывая каналы подвода жидкости в полости силового гидроцилиндра. Не дожидаясь увеличения частоты вращения двигателя, которое происходит с запаздыванием, расход топлива уменьшается.

Благодаря этому колебания частоты вращения двигателя могут быть устранены. Однако по окончании переходного процесса частота вращения ротора двигателя устанавливается на новом значении, отличном от первоначального, заданного управляющим воздействием α_{PUD} . Это отклонение и есть статическая ошибка регулятора и присущая любой САУ, оснащенной регулятором с жесткой обратной связью.

Как образуется статическая ошибка в рассматриваемом регуляторе? По окончании переходного процесса расход топлива отличается от первоначального. Но поскольку полости силового цилиндра перекрыты, точка «b» рычага $a-b-c$ находится в единственно возможном первоначальном положении. А это положение может сохраняться только тогда, когда точка «a» находится в новом положении, т.е. при новом равновесии силы грузиков 1 и пружины задатчика 2.

Переходные процессы изменения частоты вращения n при увеличении нагрузки (N) на двигатель протекают так, как это представлено на рис. 4.8.

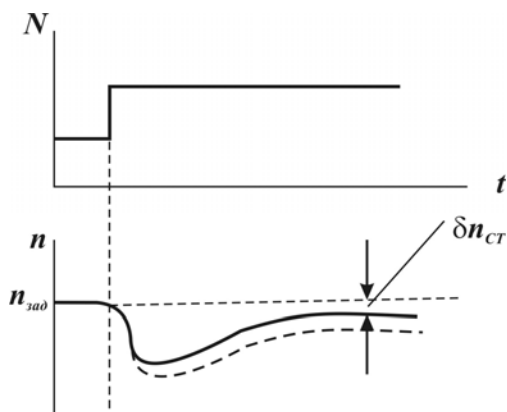


Рис. 4.8. Переходные процессы в САУ с регулятором непрямого действия с жесткой обратной связью при увеличении нагрузки на двигатель.
 $\delta n_{ст}$ – статическая ошибка регулирования

При уменьшении нагрузки переходные процессы могут протекать так, как это представлено на рис. 4.9. Как следует из рисунка, статическая ошибка при этом показывает не снижение, а превышение фактической частоты вращения двигателя над заданным вращением.

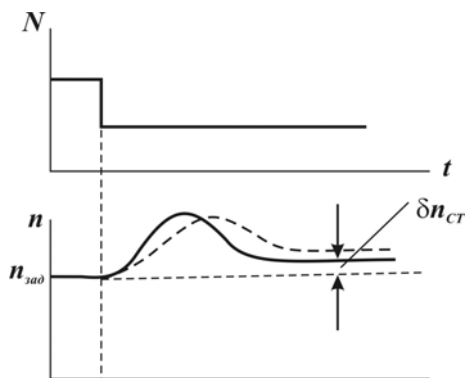


Рис. 4.9. Переходные процессы в САУ с регулятором с жесткой обратной связью при уменьшении нагрузки на двигатель

Значение статической ошибки зависит от конструктивных параметров регулятора (жесткости пружины задатчика, соотношения плеч рычага $a-b-c$, профилировки топливного крана) и выбора соответствующих значений этих параметров – она может быть достаточно малой.

4.4 САУ с регулятором с гибкой обратной связью

Устранить наличие статической ошибки при сохранении удовлетворительной динамики процесса управления позволяет использование регуляторов с гибкой обратной связью (рис. 4.10).

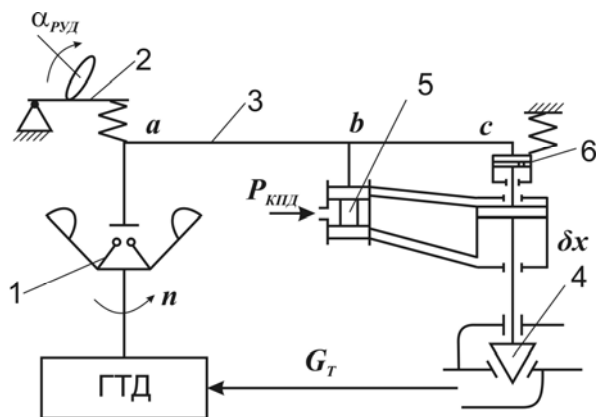


Рис. 4.10. Схема регулятора непрямого действия с гибкой обратной связью

В отличие от рассматриваемого ранее регулятора с жесткой обратной связью, действующей независимо от времени, сигнал гибкой обратной связи зависит от скорости изменения управляющего воздействия регулятора, то есть действует по времени. С этой целью в тягу обратной связи устанавливается устройство 6, так называемый «изодром». Он представляет собой гидроцилиндр, корпус которого связан с точкой «с» рычага $a-b-c$ и пружиной двухстороннего действия. Внутренний поршень изодрома соединен с поршнем силового гидроцилиндра. Поршень изодрома имеет дросселирующее отверстие, сообщающее его полости между собой. При отклонении частоты вращения ротора двигателя, как и в рассматриваемой ранее схеме,

точка «*b*» рычага *a-b-c* смещается, вызывая перемещение поршня силового цилиндра и изменяя расход топлива на входе в двигатель. Перемещение поршня силового цилиндра, в свою очередь, вызывает смещение внутреннего поршня изодрома. Если изменение расхода топлива происходит достаточно быстро, жидкость из одной полости изодрома не успевает перетекать в другую. Корпус изодрома, а с ним и точка «*c*» перемещаются, сжимая или растягивая пружину. Обратная связь в данный момент времени работает как жесткая и обеспечивает хорошую динамику процесса регулирования. По окончании переходного процесса скорость изменения расхода топлива снижается. Под действием силы пружины жидкость из одной полости изодрома через отверстия перетекает в другую полость. Процесс управления заканчивается, когда при неизменном расходе топлива точка «*c*» становится в единственное первоначальное положение, а значит и точка «*a*» остается так же в первоначальном положении. При этом фактическое значение частоты вращения грузиков сохраняется на первоначальном уровне без статической ошибки. Поэтому такой регулятор носит название астатического, то есть не имеющего статической ошибки.

Процессы регулирования при увеличении нагрузки на двигатель могут протекать так, как это представлено на рис. 4.11.

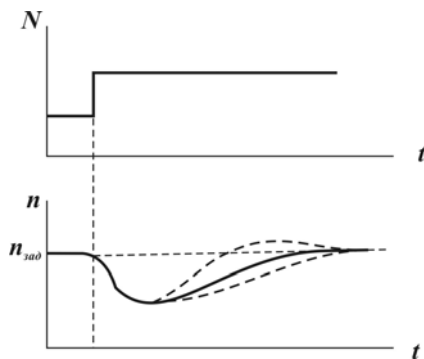


Рис. 4.11. Переходные процессы в САР с регулятором с гибкой обратной связью

Конкретный вид переходного процесса зависит от параметров регулятора (размеров, жесткости пружины изодрома, сопротивления жиклера и др.) При соответствующем соотношении этих параметров может быть обеспечена наилучшая форма переходного процесса.

4.5 Практическая часть выполнения исследований

Исследования выполняются в несколько этапов.

На жестком диске компьютера по адресу D:\people\1Санчугов находится несколько папок, в которых помещены файлы Simulink (рис. 4.12).

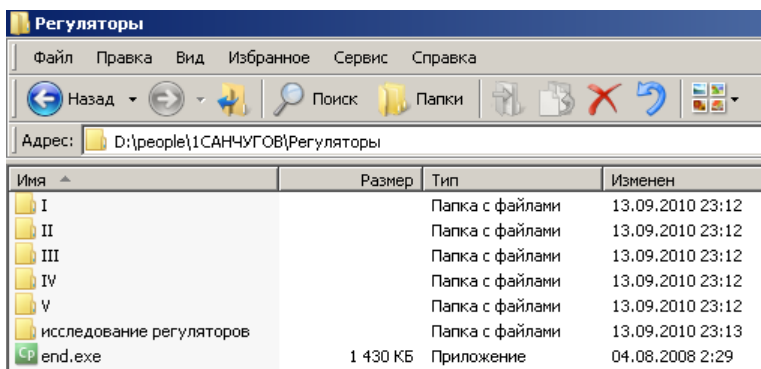


Рис. 4.12. Внешний вид папок

Номер папки соответствует типу системы регулирования:

- I – собственно двигатель как объект управления;
- II – регулятор прямого действия;
- III – астатический регулятор непрямого действия;
- IV – статический регулятор непрямого действия;
- V – регулятор непрямого действия с гибкой обратной связью (изоморфный).

На первоначальном этапе исследуется переходная характеристика автономного ГТД (папка I) (рис. 4.13) при ступенчатом изменении расхода топлива. Переходный процесс изображается на экране монитора. С целью сокращения времени и повышения наглядности исследования проводятся для трех идентичных вариантов структурных схем, отличающихся различными постоянными времени (T_d) и коэффициентами усиления (K_d). Для этого открывается соответствующий файл (T_{var} или K_{var}) папки I и вводится значение коэффициентов, заданных преподавателем. При этом значение второго коэффициента остается постоянным. Полученные графики переходного

процесса позволяют сделать анализ влияния коэффициентов (T_d или K_d) на свойства ГТД как объекта управления по частоте вращения.

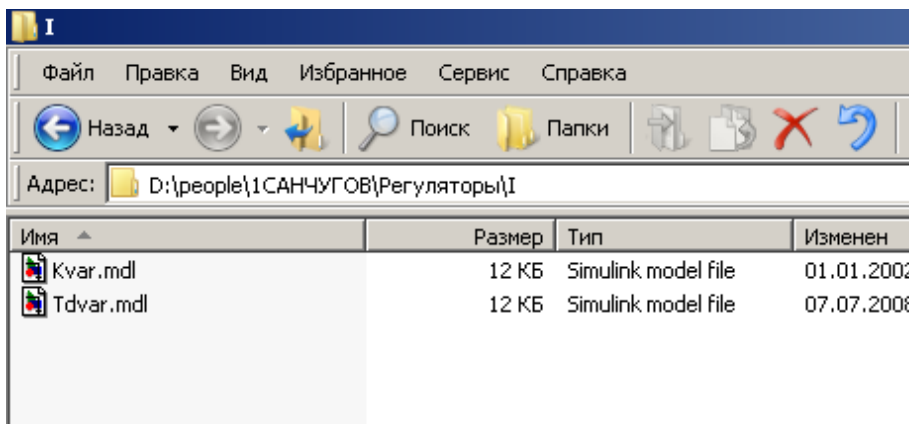


Рис. 4.13. Внешний вид файлов в папке I

На следующих этапах проводятся исследования САР с регуляторами рассмотренных ранее схем. Папки II, III, IV, V содержат файлы K_{var} и N_{var} (рис. 4.14).

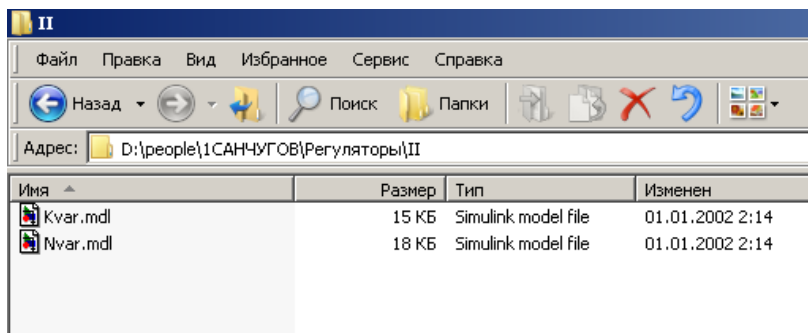


Рис. 4.14. Внешний вид файлов в папках II, III, IV, V

При этом исследуется влияние параметров регуляторов, значение которых достаточно просто изменяется, для чего двойным щелчком открывается соответствующий блок и вводится новое значение коэффициента (рис.4.15).

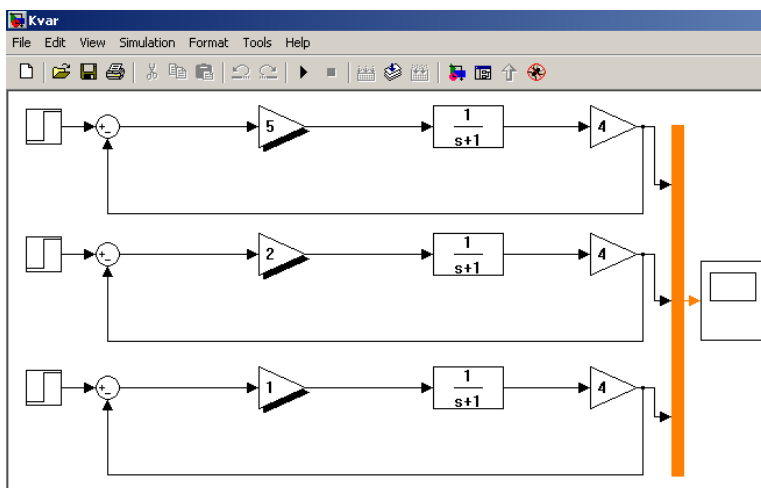


Рис. 4.15. Внешний вид структурной схемы регулятора в приложении Simulink

Исследование влияния внешних нагрузок, действующих на двигатель, смоделировано ступенчатым изменением нагрузки. Это позволяет наглядно представить особенности работы регуляторов различных схем. Величины отклонения в исходном варианте программного обеспечения составляют 10 процентов.

При любом переходе к следующему варианту регулятора предыдущие параметры структурных схем остаются неизменными.

Отчет о выполненных исследованиях должен содержать:

- цель исследований;
- структурные схемы ГТД и систем автоматического регулирования с параметрами исследуемых схем;
- переходные характеристики исследуемых систем регулирования;
- выводы об особенностях работы, статической ошибке и других параметрах работы различных регуляторов частоты вращения.

5 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЯМИ С ЭЛЕКТРОННЫМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

Развитие современной техники и технологий непрерывно сопровождалось увеличением числа решаемых задач, требований по точности их выполнения. Это, в свою очередь, приводило к усложнению систем управления, стоимости их разработки и производства, снижению надежности работы.

Управлять такими системами вручную становилось все сложнее и сложнее, а порой и невозможно. Поэтому стали появляться различные автоматизированные системы, облегчающие труд человека.

До середины XX столетия для управления техническими системами повсеместно использовались гидромеханические системы.

Такие системы использовали аналоговую измерительную информацию в виде сигналов по перемещению, углу поворота, частоте вращения, поступающих от датчиков – преобразователей информации. Для получения управляющих сигналов использовались различные типы гидропневмопреобразователей информации с анероидными коробками и мембранами, с пружинами, многочисленными дросселями, поворотными заслонками, клапанами и золотниковыми распределителями. Источниками энергии в таких системах являлись жидкости и газы с различными давлениями. Такие системы становились все более громоздкими и менее надежными.

Так, гидромеханическая система топливопитания и управления газотурбинного авиационного двигателя второй половины прошлого столетия включала в себя несколько десятков золотниковых и клапанных элементов, различных гидроцилиндров и решающих элементов, выполняющих задачи регулирования. Масса этих регуляторов достигала десятков килограммов.

Такая тенденция еще более усугубилась в связи с применением газотурбинных двигателей, работающих на газообразном топливе. Системы дозирования подачи топлива стали газогидромеханически-

ми, в которых в качестве топлива используется газ, а в качестве рабочего тела элементов автоматики – различного сорта масло.

Появление микропроцессорной вычислительной техники произвело эволюционный переворот в развитии и использовании систем управления в решении технических и технологических задач машиностроения и эксплуатации сложных технических систем. Это объясняется, с одной стороны, несравненной простотой реализации задач законов управления методами вычислительной техники и, с другой стороны, возможностью создания автоматических систем управления, выполняющих свои функции без участия человека-оператора.

При этом в качестве объектов управления выступают сложные технические системы и устройства, различные технологические процессы производства продукции, процессы технической эксплуатации и обслуживания техники.

5.1 Структурное построение систем электронного управления

Современные системы автоматизации процессов управления технологическими процессами выполняются в соответствии со схемой, представленной на рис. 5.1 [11].

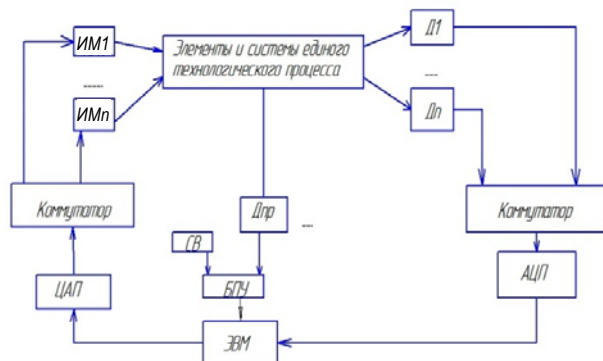


Рис. 5.1. Структурная схема систем электронного автоматического управления технологическими процессами: ИМ – исполнительные механизмы; Д – датчики первичной информации; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ЦАП – цифроаналоговый преобразователь; СВ – служба времени; Дпр – датчики прерывания технологического процесса; БПУ – блок программного управления

Система работает следующим образом:

На элементы и системы управляемого процесса или изделия устанавливаются первичные преобразователи $D_1 \dots D_n$ – датчики информации, определяющие функционирование технического процесса. Основные требования, предъявляемые к датчикам:

- датчики должны иметь электрический выходной сигнал по току, напряжению или частоте переменного тока, наиболее точно отражающий параметры измеряемого процесса;
- датчики должны иметь аналитически сформулированную градуировочную характеристику, т.е. связь входного (измеряемого) параметра и выходного сигнала, учитывающую различные входные возмущения, возмущения работы датчика.

Примечание. Различные датчики непосредственных визуальных измерений (стрелочные манометры, термометры, расходомеры и т.д.) не могут использоваться в современных управляющих системах.

Сигналы от датчиков поступают на вход в коммутатор сигналов. Коммутатор электрических сигналов датчиков предназначен для ввода измерительной информации в ЭВМ. Поскольку архитектура современных компьютеров основана на использовании и обработке одного входного сигнала, коммутатор должен одновременно пропускать на выход только один сигнал. Последовательность подключения входных сигналов датчиков к выходному каналу определяется специальной программой, управляющей работой коммутатора.

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП). Поскольку сигналы от датчиков являются, как правило, непрерывными аналоговыми величинами, АЦП осуществляет преобразование этих сигналов в цифровой код, воспринимаемый ЭВМ. Суть работы АЦП заключается в том, что через определенные промежутки времени непрерывный аналоговый сигнал заменяется последовательностью его цифровых значений, которая соответствовала бы заданной точности измерений. Эта задача носит название определения шага дисперсности или шага квантования. При квантовании непрерывной величины точность ее представления последовательностью значений, полученных по результатам измерений в дискретных точках, зависит от количества этих точек. При большом количестве этих точек замена будет точнее, но количество точек растет. Поэтому при замене непрерывного сигнала последовательностью его значений необходимо решить задачу: каково должно быть наименьшее количество точек m , чтобы по-

грешность такого представления σ не превосходила некоторую допустимую величину σ ? Ответ на этот вопрос дает теорема русского математика Котельникова, являющаяся основой теории информатики. Если непрерывная функция $f(t)$ не содержит в своем спектре составляющих с частотой выше

$$f_B = \frac{\omega_B}{2\pi},$$

то она полностью определяется последовательностью своих дискретных значений, взятых в точках, установленных одна от другой во времени на интервалы

$$\Delta t = \frac{1}{2f_B} = \frac{\pi}{\omega_B},$$

где ω_B – круговая частота, ограничивающая высокочастотную часть спектра колебательного процесса, которую можно не принимать во внимание.

С выхода АЦП сигналы поступают в ЭВМ. Основная цель ЭВМ в процессе автоматизации управления любым техническим процессом состоит в том, чтобы выработать управляющие команды на коррекцию хода выполнения технологического процесса.

Для этого:

- в ЭВМ должна быть заложена программа управляемого процесса;
- ЭВМ должна содержать математическую модель управляемого процесса и управляющего регулятора;
- ЭВМ должна осуществлять обработку поступающей от датчиков информации с тем, чтобы исключить ошибки измерений, уменьшить разброс результатов измерений и уменьшить объем поступающей информации;
- ЭВМ должна обеспечивать безопасность выполнения технологического процесса в любых ситуациях его выполнения;
- ЭВМ должна обеспечить выдачу технической, технико-экономической и другой полезной информации о параметрах управляемого процесса.

Установленная в условиях современного производства АСУ должна быть удобной в эксплуатации, удовлетворять требованиям

высокой надежности, точности измерений и регистрации параметров и обладать достаточным быстродействием.

Статистика показывает, что основную массу информации составляют измерения на установившихся режимах работы объектов. Измерения на этих режимах имеют близкий к стационарному случайному процессу характер и обладают свойствами эргодичности, то есть по любой реализации $x(\tau)$ процесса измерений x в течение достаточно продолжительного времени τ могут быть найдены все характеристики случайного процесса:

- математическое ожидание

$$M(x) = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} x(\tau) d(\tau);$$

- дисперсия

$$D(x) = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau_0} \int_0^{\tau_0} [x(\tau) - M(x)]^2 d(\tau);$$

- корреляционная функция

$$k_{\chi}(\Delta x) = \lim_{\tau_0 \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau_0 - \Delta\tau} \int_0^{\tau_0} [x(\tau) - M(x)] \cdot [x(\tau + \Delta\tau) - M(x)] d\tau.$$

Выработанные в ЭВМ управляющие команды с помощью цифроаналогового преобразователя передаются к определенным исполнительным механизмам. Последние осуществляют необходимую коррекцию хода выполнения технологического процесса.

К исполнительным механизмам относятся:

- различные гидро- и пневмоцилиндры;
- гидropневмораспределители с электрическим управлением;
- заслонки, вентили и поворотные механизмы;
- электромагниты и т.д.

В случае выхода значений некоторых параметров за пределы допускаемых эти значения передаются в ЭВМ для безопасного прерывания технологического процесса.

В системе также должен находиться блок программного управления, в котором хранится вся программа обработки технологического процесса и выдача необходимой информации.

5.2 Основные законы управления

Основу современных электронных систем управления составляют электронно-вычислительные машины, работающие с цифровой информацией. В таких системах вся поступающая обрабатываемая и выходящая в цепь управления информация может использоваться только в виде математического описания и математических моделей.

В течение многих десятков и сотен лет технические устройства различной природы (электрические, гидравлические, пневматические, механические и т.д.) выполнялись на основе различных физических законов, определяющих их работу. Для более глубокого их изучения все шире стала использоваться математика и математические модели.

Регуляторы стали появляться только в XX столетии. С усложнением их схем и конструкции для изучения их работы и проектирования были открыты законы управления.

Эти законы связывают входные сигналы $x_{\text{вх}}$, поступающие на вход в регулятор, и управляющие воздействия $x_{\text{ув}}$, вырабатываемые регулятором.

При этом отклонения управляющих воздействий и управляемой величины записываются в относительных координатах по отношению к каким-то базовым значениям x_0 и $x_{\text{зад0}}$:

$$\delta x_{\text{ув}} = \frac{x_{\text{ув}} - x_0}{x_0}; \quad \delta x_{\text{вх}} = \frac{x_{\text{вх}} - x_{\text{зад0}}}{x_{\text{зад0}}}.$$

Пропорциональный закон. Этот простейший закон, известный еще с позапрошлого столетия, записывается в виде

$$\delta x_{\text{ув}} = k_p \cdot \delta x_{\text{вх}}. \quad (5.1)$$

Современные методы моделирования основаны на описании характеристик автоматических систем в виде передаточных функций. Передаточная функция системы или отдельного устройства представляет собой отношение операторных изображений по Лапласу $W(s)$ выходного сигнала к входному. В данном случае

$$W(s) = \frac{\delta x_{\text{ув}}}{\delta x_{\text{вх}}} = k_p. \quad (5.2)$$

Регуляторы, осуществляющие этот закон, называются П-регуляторами. К ним относятся регуляторы прямого действия. Так гидродинамическая система управления с регулятором частоты вращения двигателя выполнялась по схеме, представленной на рис. 5.2.

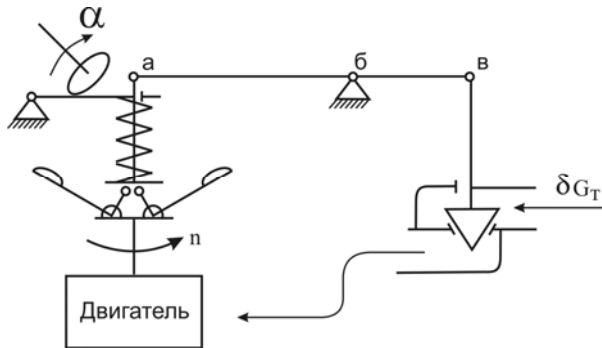


Рис. 5.2. Простейшая система управления частотой вращения двигателя с регулятором прямого действия

Без учета трения в узлах изменение частоты вращения двигателя в зависимости от расхода топлива описывается выражением

$$\delta G_T = k_p \cdot \delta n,$$

где k_p – коэффициент, учитывающий особенности конструкции регулятора (соотношение плеч рычага $a - б - в$, форму топливного крана, жесткость пружины и т.д.).

Работу регулятора, как это следует из формул (5.1) и (5.2), определяет коэффициент k_p , который отражает свойства конструкции регулятора и носит название коэффициента усиления (или передачи).

Интегральный закон (И-регулятор). Аналитически интегральный закон записывается в виде

$$\delta x_{ув} = \frac{1}{T_{И}} \int_0^t \delta x_{вх} dt. \quad (5.3)$$

Коэффициент $T_{И}$ имеет размерность времени и называется постоянной времени интегрирования. Передаточная функция И-регулятора имеет выражение:

$$W_{II}(s) = \frac{1}{T_{II}s}, \quad (5.4)$$

где s – оператор дифференцирования (d/dt).

В отличие от пропорционального закона интегральный регулятор вырабатывает управляющее воздействие с учетом продолжительности отклонения управляемой величины от заданного значения.

Пропорционально-интегральный закон (ПИ-регулятор). Имеет связь входного сигнала (управляющего воздействия) с отклонением управляемой величины от заданного значения на выходе:

$$\delta x_{ув} = k_p \left(\delta x_{вх} + \frac{1}{T_{II}} \int_0^t \delta x_{вх} dt \right), \quad (5.5)$$

где T_{II} – постоянная времени интегрирования.

Передаточная функция, отражающая работу ПИ-регулятора, записывается в виде

$$W_{III}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{II}} \frac{1}{s} \right). \quad (5.6)$$

Выражения (5.5) и (5.6) показывают, что управляющее воздействие ПИ-регулятора вырабатывается с учетом величины и продолжительности отклонения управляемой величины.

Пропорционально-интегрально-дифференциальный закон (ПИД-регулятор) имеет выражение:

$$\delta x_{ув} = k_p \left(\delta x_{вх} + \frac{1}{T_{II}} \int_0^t \delta x_{вх} dt + K_D \frac{d \delta x_{вх}}{dt} \frac{1}{T_D \frac{d \delta x_{вх}}{dt} + 1} \right). \quad (5.7)$$

Передаточная функция ПИД-регулятора имеет вид:

$$W_{mю}(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_{II}} \frac{1}{s} + \frac{K_D s}{T_D s + 1} \right), \quad (5.8)$$

где T_D – постоянная дифференцирования. Принято считать, что ПИД-регулятор дает наилучшее качество регулирования, поскольку управляющий сигнал вырабатывается не только с учетом величины и

длительности отклонения регулируемого параметра, но и с учетом скорости его изменения. При соответствующей настройке коэффициентов k_p , T_I и T_D можно обеспечить наилучшее качество переходных процессов управления объектом практически любой сложности.

Некоторой разновидностью ПИД-регулирования является *пропорционально-дифференциально-дифференциальный закон* (ПДД-регулятор).

Работа ПДД-регулятора описывается выражением

$$\delta x_{yb} = k_p \left(\delta x_{bx} + T_D \frac{d\delta x_{bx}}{dt} + T_D'' \frac{d^2\delta x_{bx}}{dt^2} \right) \quad (5.9)$$

или передаточной функцией

$$W_{ПДД}(s) = k_p (1 + T_D s + T_D'' s^2). \quad (5.10)$$

Такой регулятор позволяет учесть не только скорость отклонения регулируемого параметра, но и ускорение его отклонения.

Настроечными коэффициентами регулятора, определяющими параметры переходного процесса, являются k_p , T_D и T_D'' .

Зона нечувствительности

Для улучшения (стабильности) работы регулятора при небольшом значении рассогласования $\delta x_{bx} = x_{зад} - \delta x_{вых}$ в формулах (5.7), (5.9) вместо δx_{bx} используется уточненное значение δx_{bx}^* , определяемое с использованием зоны нечувствительности регулятора следующим образом:

$$\delta x_{bx}^* = \begin{cases} 0, & \text{если } |\delta x_{bx}| \leq x_p, \\ \delta x_{bx} - x_p/2, & \text{если } \delta x_{bx} > x_p/2, \\ \delta x_{bx} + x_p/2, & \text{если } \delta x_{bx} < -x_p/2, \end{cases} \quad (5.11)$$

где x_p – ширина зоны нечувствительности.

При нахождении управляемого параметра в диапазоне $|\delta x_{bx}| \leq x_p/2$ управляющее воздействие определяется только интегральной составляющей.

Ограничение величины управляющего воздействия

Ограничения пределов изменения управляющего воздействия на минимальном и максимальном уровнях позволяет ограничить

функционирование объекта управления за пределами безопасной работы. При этом

$$\delta x_{ув} * = \begin{cases} \delta x_{ув} , & \text{если } \delta x_{ув \min} \leq \delta x_{ув} \leq \delta x_{ув \max} \\ \delta x_{ув \min} , & \text{если } \delta x_{ув} < \delta x_{ув \min} \\ \delta x_{ув \max} , & \text{если } \delta x_{ув} > \delta x_{ув \max} \end{cases} \quad (5.12)$$

Величины $\delta x_{ув \min}$ и $\delta x_{ув \max}$ определяются для каждого объекта управления индивидуально.

Продолжительное время перед учеными и конструкторами регулирующей аппаратуры стояла задача: как совместить работу гидромеханической системы, рабочим телом в которой является жидкость или газ и обладающей мощностью в десятки киловатт, с работой электронной системы, рабочим телом в которой является поток электронов и мощность которой несоизмеримо меньше, чем мощность гидромеханической системы.

В процессе решения данной задачи были найдены достаточно простые и удобные подходы.

Одни из них заключаются в использовании электромагнитных клапанов, воздействующих на механизм гидравлического привода топливного дозирующего механизма. На рис. 5.3 представлена принципиальная схема работы такого устройства.

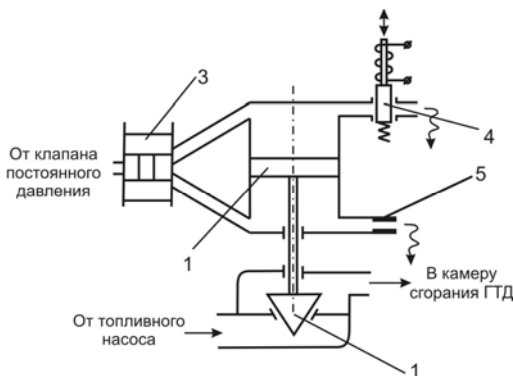


Рис. 5.3. Пример работы исполнительного механизма электронного регулятора частоты вращения двигателя:

1 – устройство дозирования расхода топлива; 2 – поршень гидромеханического привода дозирующего устройства; 3 – распределитель рабочей жидкости; 4 – электромагнитный клапан электронной системы управления; 5 – жиклер

5.3 Модель электронного ПИД-регулятора

Для выполнения исследований работы ПИД-регулятора на компьютере в папке «электронные регуляторы» размещен файл «ПИД регулятор». При открытии этого файла на экране монитора появляются четыре математические модели регуляторов частоты вращения ротора газотурбинного двигателя (рис. 5.4).

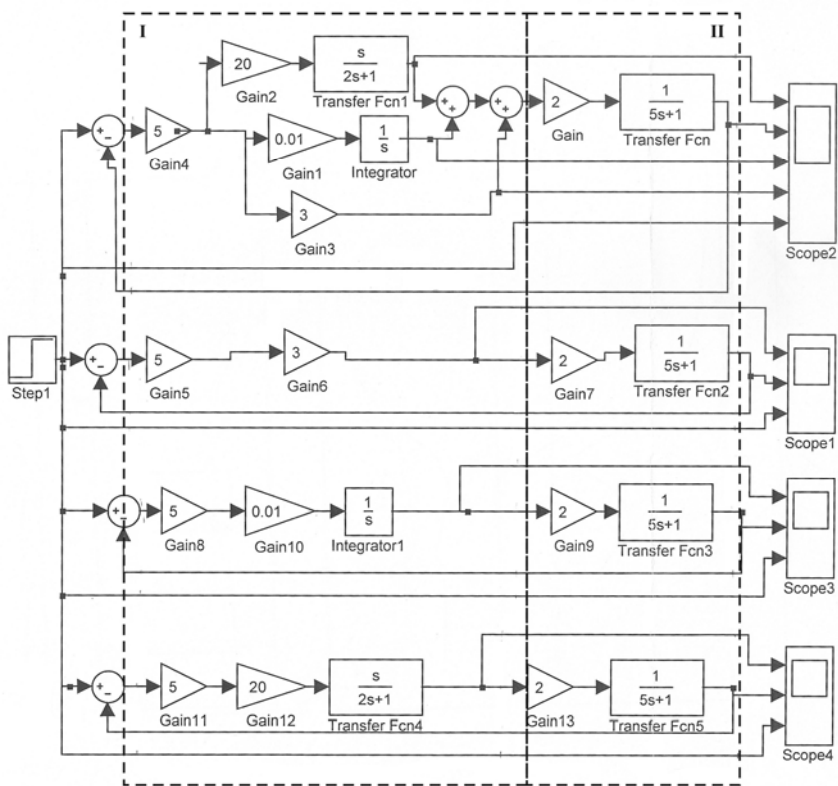


Рис. 5.4. Модели для исследования работы ПИД-регулятора:
I – регулятор; II – объект управления

В левой части моделей размещается блок «Step», имитирующий скачкообразное изменение заданного режима работы двигателя. Настройка блока позволяет изменить начальный уровень скачка, время возмущающего воздействия и выходной уровень воздействия.

Для настройки блока необходимо подвести курсор к полю блока и дважды щелкнуть правую клавишу мыши. В выпадающем окне выполнить изменение настроек блока и сохранить выполнение настройки. Контроль выполненных настроек осуществляется нижним лучом осциллографа-регистратора Score.

Центральная часть моделей, ограниченная пунктирной линией и цифрой I, отображает модели регуляторов. Верхняя часть модели представляет собой ПИД-регулятор, описываемый формулой (5.7). Параметры работы и модели контролирует осциллограф Score 2, на котором сверху вниз выводятся следующие сигналы:

- сигнал на выходе дифференциальной части регулятора;
- сигнал на выходе объекта управления;
- сигнал на выходе интегральной части регулятора;
- сигнал на выходе пропорциональной части регулятора;
- сигнал на выходе блока возмущающего воздействия Step1.

Правая часть моделей, обозначаемая цифрой II, отображает свойства объекта управления и состоит из блока усиления «Gain» и блока «Transfer Fcn».

Ниже на экране монитора представлены три модели, составляющие полную модель ПИД-регулятора:

- модель пропорциональной части регулятора, контролируемая осциллографом Score 1;
- модель интегральной составляющей регулятора, контролируемая осциллографом Score 3;
- модель дифференциальной составляющей регулятора, контролируемая осциллографом Score 4.

Использование этих вспомогательных моделей позволяет получить наглядное представление об особенностях работы составляющих частей ПИД-регулятора с одним и тем же объектом управления.

5.4 Порядок выполнения лабораторной работы

5.4.1 Изучить структуру математической модели ПИД-регулятора частоты вращения двигателя, представленную для изучения, для чего открыть папку «Электронные регуляторы».

5.4.2 По заданию преподавателя ввести в модель коэффициенты, характеризующие свойства двигателя (K_{Gain} и T_g) как объекта управления.

5.4.3 Вначале провести исследования работы отдельных составляющих ПИД-регулятора:

- пропорционального регулятора;
- интегрального регулятора;
- дифференциального регулятора.

Исследования проводятся путем изменения коэффициентов регуляторов. Анализ выполнения исследований заключается в определении изменений основных параметров реализуемых переходных процессов:

- времени и формы переходных процессов;
- наличие статических ошибок регулирования;
- величин перерегулирования и колебаний регулируемой величины.

5.4.4 Выполнить анализ влияния обратной связи на основные параметры переходного процесса. Для этого зарегистрировать форму переходного процесса регулятора с обратной связью. Затем разорвать обратную связь и повторить оценки переходного процесса. Сделать вывод об изменении параметров переходного процесса.

5.5 Содержание отчета о результатах лабораторной работы

5.5.1 Привести уравнения, описывающие связь управляющего воздействия ПИД-регулятора с отклонением входного сигнала.

5.5.2 Дать схему модели ПИД-регулятора.

5.5.3 Описать результаты выполненных исследований работы ПИД-регулятора:

- описать изменение основных параметров переходного процесса при изменении параметров регулятора;
- описать влияние обратной связи на параметры переходного процесса.

6 УСТОЙЧИВОСТЬ ДВИЖЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ [1,6]

6.1 Понятие об устойчивости движения

Одной из основных задач теории автоматического управления является изучение динамических процессов изменения режимов работы механических устройств как объектов управления. Системы автоматического управления должны при нормальных условиях эксплуатации объектов поддерживать заданные режимы их работы. При этом нормально функционирующая система должна уменьшить появившееся рассогласование между заданным и фактическим режимами работы. Однако на практике может получиться так, что под действием возмущений это рассогласование увеличится, что приведет к нарушениям заданного режима работы. В качестве примера на рис. 6.1 представлены переходные процессы изменения регулируемого выходного параметра $Y_{\text{вых}}(t)$ системы после появившегося рассогласования $\Delta Y_{\text{вых}}$.

При этом если начальное рассогласование системы (рис. 6.1,а) стремится к нулю и система возвращается к исходному заданному положению (или к первоначальному заданному режиму движения), такую систему называют устойчивой.

Если начальное рассогласование системы увеличивается – систему называют неустойчивой (рис. 6.1,б) и, наконец, если система после первоначального возмущения совершает незатухающие колебания, то говорят, что система находится на границе устойчивости.

Поэтому понятие устойчивости формулируется следующим образом. Устойчивость движения устройств, машин и механизмов – это способность сохранить заданное положение или режим движения после действия управляющего воздействия или возмущения.

6.2 Условия устойчивости движения

В общем случае движение объекта управления, которое оценивается изменением регулируемого параметра $Y_{\text{ВЫХ}}$, описывается дифференциальным уравнением при входном воздействии $X_{\text{ВХ}}$:

$$a_0 \frac{d^n Y_{\text{ВЫХ}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} Y_{\text{ВЫХ}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{d Y_{\text{ВЫХ}}}{dt} + a_0 Y_{\text{ВЫХ}} = b_0 \frac{d^m X_{\text{ВХ}}}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} X_{\text{ВХ}}}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{d X_{\text{ВХ}}}{dt} + b_m X_{\text{ВХ}}. \quad (6.1)$$

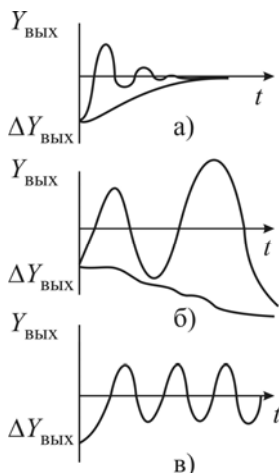


Рис. 6.1. Переходные процессы изменения выходного параметра $\Delta Y_{\text{ВЫХ}}$ после действия возмущения:
а – в устойчивой системе; б – в неустойчивой системе;
в – в системе, находящейся на границе устойчивости

Как это принято в автоматике, уравнение (6.1) составляется таким образом, что в левой части уравнения представлено изменение выходного параметра системы и все его производные со своими коэффициентами a_0, a_1, \dots, a_n . Эти коэффициенты отражают внутренние (собственные) свойства управляемого объекта и определяются его схемами, устройством, размерами и др. параметрами конструкции.

Коэффициенты b_0, b_1, \dots, b_m отражают свойства действующих возмущений и управляющих воздействий.

Определить движение объекта управления – значит решить дифференциальное уравнение (6.1) относительно регулируемого параметра $Y_{\text{ВЫХ}}(t)$. Решение уравнения (6.1) представляет собой сумму общего и частного решений:

$$Y_{\text{ВЫХ}}(t) = [Y_{\text{ВЫХ}}(t)]_{\text{общее}} + [Y(t)]_{\text{частн}}. \quad (6.2)$$

Общее решение $[Y_{\text{ВЫХ}}(t)]_{\text{общее}}$ описывает решение уравнения (6.1) при правой части, равной нулю. Такое уравнение общепринято называть однородным. Решение однородного уравнения описывает движение системы, которое происходит под действием соответствующих внутренних свойств при отсутствии возмущений и каких-либо управляющих воздействий.

Частное решение уравнения (6.1) $[Y(t)]_{\text{частн}}$ определяет движение системы, происходящее под действием возмущений и управляющих воздействий. При этом движение системы не может прекратиться и всегда происходит с параметрами, определяемыми этими возмущениями и воздействиями.

Именно потому для определения устойчивости движения необходимо решать не полное уравнение (6.1), а только однородное уравнение, в котором правая часть равна нулю:

$$a_0 \frac{d^n Y_{\text{ВЫХ}}}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} Y_{\text{ВЫХ}}}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dY_{\text{ВЫХ}}}{dt} + a_0 Y_{\text{ВЫХ}} = 0. \quad (6.3)$$

Решение такого уравнения записывается в виде:

$$[Y_{\text{ВЫХ}}(t)]_{\text{общее}} = C_1 e^{r_1 t} + C_2 e^{r_2 t} + \dots + C_n e^{r_n t} = \sum_{i=1}^n C_i e^{r_i t}, \quad (6.4)$$

где C_i – постоянные интегрирования, определяемые начальными условиями решения;

r_i – корни уравнения.

$$D(z) = a_0 r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_n = 0. \quad (6.5)$$

Уравнение (6.4) показывает, что движение системы является суммой составляющих $C_i e^{r_i t}$ и определяется величиной корней r_i характеристического уравнения (6.5).

Рассмотрим вид составляющих движения системы от вида корней, представленный на рис. 6.2.

Корни могут быть вещественными, комплексными и чисто мнимыми.

1. Вещественный корень. Если он отрицательный ($r_i = -\alpha_i$, где α_i – действительное число, большее 0), то слагаемое, определяемое этим корнем в (6.2), будет представлять собой экспоненту $C_i e^{-\alpha_i t}$ (рис. 6.2,а). Очевидно, что при $t \rightarrow \infty$ составляющая будет затухать.

При $r_i = +\alpha_i$ получится расходящийся процесс $C_i e^{+\alpha_i t}$ (рис. 6.2,б).

2. Комплексные корни. Комплексные корни всегда попарно сопряженные. При отрицательной вещественной части два корня, например r и r_{i+1} , будут иметь вид: $r_i, r_{i+1} = -\alpha \pm j\beta$. В этом случае слагаемые, определяемые этими корнями в (6.3), могут быть представлены в виде

$$C_i e^{-(\alpha+j\beta)t} + C_i e^{-(\alpha-j\beta)t} = A e^{-\alpha t} \sin(\beta t + \varphi),$$

где A и φ – новые постоянные интегрирования.

Нетрудно видеть, что в этом случае получаются затухающие колебания, причем мнимая часть корня β представляет собой круговую частоту затухающих колебаний, а α – показатель затухания, определяющий затухание огибающей к кривой переходного процесса (рис. 6.2,в).

При положительной вещественной части корня

$$r_i, r_{i+1} = +\alpha \pm j\beta$$

колебания будут расходящимися (рис. 6.2,г):

$$C_i e^{(\alpha+j\beta)t} + C_{i+1} e^{(\alpha-j\beta)t} = A e^{\alpha t} \sin(\beta t + \varphi).$$

3. Чисто мнимые корни. В этом случае $r_i = +j\beta$, $r_{i+1} = -j\beta$.

Слагаемое, определяемое этими корнями в (6.3), будет представлять собой незатухающие колебания с постоянной амплитудой:

$$C_i e^{j\beta t} + C_{i+1} e^{-j\beta t} = A \sin(\beta t + \varphi).$$

Такой процесс изображен на рис. 6.2,д.

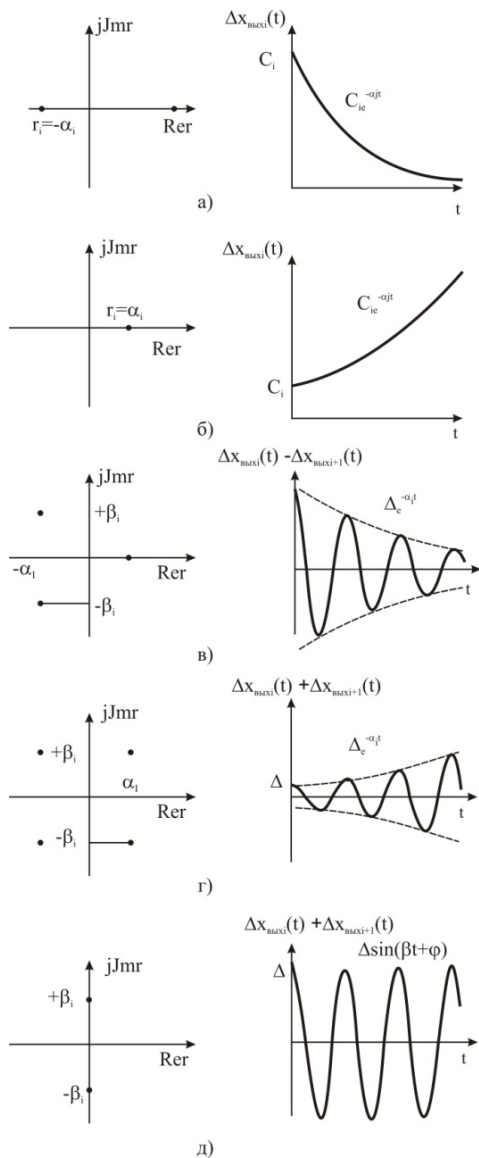


Рис. 6.2. Изображение условий устойчивости в плоскости корней:
 а – случай отрицательного вещественного корня; б – случай положительного
 вещественного корня; в – случай комплексно-сопряженных корней
 с отрицательной вещественной частью; г – случай комплексно-сопряженных
 корней с положительной вещественной частью;
 д – случай чисто мнимых корней

6.3 Признаки и критерии устойчивости движения

Признак выражает необходимое, но недостаточное условие устойчивости. Критерий выражает необходимое и достаточное условие устойчивости.

Для оценки устойчивости системы рассматривают характеристическое уравнение:

$$a_0 r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_{n-1} r + a_n = 0,$$

которое можно представить в виде

$$a_0 (r - r_1)(r - r_2) \dots (r - r_n) = 0.$$

Из последнего выражения следует: в случае отрицательных корней все коэффициенты в характеристическом уравнении будут положительны. Если будет хотя бы один положительный корень, то произойдет не менее одной смены знака в исходном характеристическом уравнении.

Сказанное позволяет сформировать признак устойчивости:

Для устойчивости движения необходимо, чтобы все коэффициенты характеристического уравнения имели одинаковый знак.

6.4 Алгебраический критерий устойчивости (критерий Рауса-Гурвица)

Австрийские математики Раус и Гурвиц в 1895 году нашли условия, при которых многочлен любой степени не содержит корней с положительной вещественной частью.

Рассмотрим характеристическое уравнение САУ n -го порядка:

$$a_0 r^n + a_1 r^{n-1} + \dots + a_{n-1} r + a_n = 0. \quad (6.6)$$

Алгебраический критерий устойчивости (критерий Рауса-Гурвица) формулируется следующим образом:

- для устойчивости САУ необходимо и достаточно, чтобы при $a_0 > 0$ все диагональные миноры квадратной матрицы Гурвица, составленной из коэффициентов характеристического уравнения, были положительны.

Определитель Гурвица составляется из коэффициентов характеристического уравнения следующим образом:

- по диагонали определителя выписываются все коэффициенты от a_1 до a_n в порядке возрастания (слева – направо, сверху – вниз);
- заполнение столбцов от диагонального коэффициента производится: вверх – коэффициентами уравнения с большими индексами; вниз – коэффициентами уравнения с меньшими индексами.

$$\Delta = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n \end{vmatrix}$$

Из этого критерия вытекает, что для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы коэффициенты характеристического уравнения были больше нуля.

6.5 Критерий устойчивости Михайлова

Частотные критерии устойчивости позволяют судить об устойчивости САУ по виду их частотных характеристик. Эти критерии являются графоаналитическими и получили широкое распространение, так как позволяют сравнительно легко исследовать устойчивость систем высокого порядка и имеют простую геометрическую интерпретацию и наглядность.

В основе частотных критериев устойчивости лежит следствие из известного в теории функций комплексного переменного принцип аргумента.

Когда задан полином n -степени, являющийся собственным оператором системы

$$D(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0,$$

тогда в соответствии с теоремой Безу (Виетта) его можно представить в виде:

$$D(s) = a_n(s - P_1)(s - P_2) \dots (s - P_n), \quad (6.7)$$

где $P_i = \alpha_i \mp j\omega$ – корни характеристического уравнения $D(s) = 0$.

На комплексной плоскости каждый корень геометрически может быть изображен вектором, проведенным из начала координат к точке P_i .

Величины $(s - P_i)$, заключенные в скобки выражения (6.7), также являются векторами, проведенными из точки P_i к точке s . В частотной области точки s представляют собой комплексное число $j\omega$, т.е. $s = j\omega$, где ω – частота колебаний. На рис. 6.3 представлены графические изображения векторов P_i и $j\omega$ для случая вещественных корней α_1 и α_2 и попарно сопряженных корней (рис. 6.4)

$$\begin{cases} \alpha_3 + j\omega & \begin{cases} -\alpha_5 + j\omega \\ -\alpha_6 - j\omega. \end{cases} \end{cases}$$

На рис. 6.3 показано изменение векторов $(j\omega - P_i)$ характеристического уравнения (6.7) для случая вещественных корней. Графики показывают, что если корень $\alpha_1 > 0$, то при изменении ω от 0 до ∞ вектор $j\omega - \alpha_1$ повернется по часовой стрелке на угол $\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$. А если корень α_2 отрицательный, то вектор $j\omega - \alpha_2$ повернется на угол $\alpha_2 = \frac{\pi}{2}$ против движения часовой стрелки.

Аналогичные рассуждения для случая комплексных сопряженных корней α_3, α_4 и α_5, α_6 (рис. 6.4) показывают, что при α_3 и $\alpha_4 > 0$ пары векторов $(j\omega - \alpha_3)$ и $(j\omega - \alpha_4)$ повернутся на угол $2\frac{\pi}{2}$ против часовой стрелки.

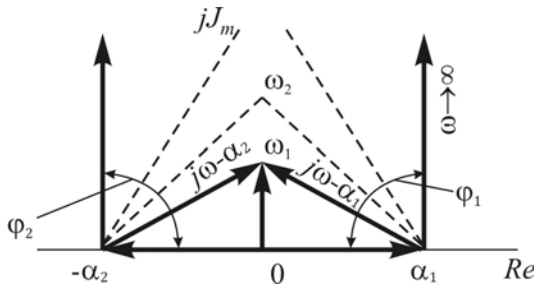


Рис. 6.3. Изменения векторов $(j\omega - P_i)$ характеристического уравнения для случая вещественных корней $\alpha_1 > 0$; $\alpha_2 > 0$

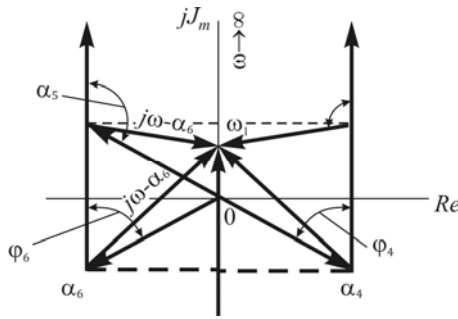


Рис. 6.4. Изменения векторов $(j\omega - P_i)$ характеристического уравнения для случая комплексных сопряженных корней $\alpha_3, \alpha_4 > 0$; $\alpha_5, \alpha_6 > 0$

Таким образом, если характеристическое уравнение будет иметь l корней с положительной вещественной частью, то каковы бы ни были эти корни (вещественные или комплексные), им будет соответствовать сумма углов поворотов, равная $-l\frac{\pi}{2}$. Всем же остальным $n - l$ корням характеристического уравнения, имеющим отрицательные вещественные части, будет соответствовать сумма углов поворотов, равная $(n - l)\frac{\pi}{2}$. В результате общий угол поворота вектора $D(j\omega)$ при изменении ω от нуля до бесконечности будет:

$$\varphi = (n - l)\frac{\pi}{2} - l\frac{\pi}{2} = n\frac{\pi}{2} - l\pi. \quad (6.8)$$

С учетом этого критерий Михайлова можно сформулировать следующим образом:

Для того, чтобы САУ была устойчивой, необходимо и достаточно, чтобы годограф Михайлова начинался на положительной полуоси действительной оси при изменении частоты ω от 0 до $+\infty$, последовательно проходил столько квадрантов, каков порядок характеристического уравнения (рис. 6.5).

В неустойчивых системах нарушается последовательность прохождения годографом Михайлова квадрантов, вследствие чего угол поворота вектора $D(j\omega)$ оказывается меньшим, чем $n\frac{\pi}{2}$ (рис. 6.6).

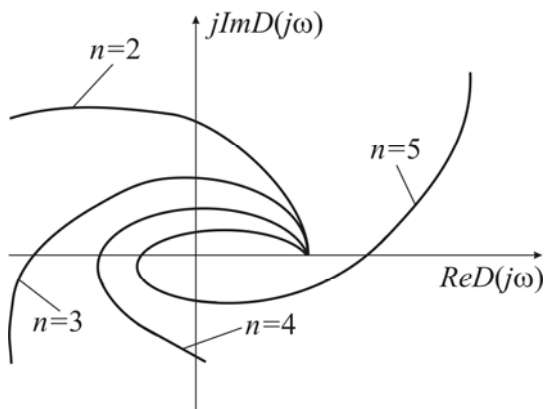


Рис. 6.5. Годограф Михайлова для устойчивых САУ степени n

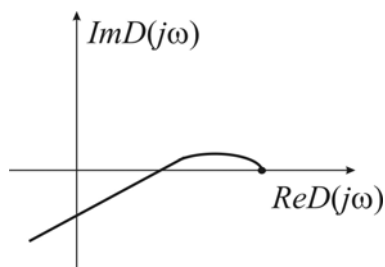


Рис. 6.6. Годограф Михайлова для неустойчивой САУ

Критерий Михайлова применяется для анализа устойчивости как замкнутых, так и разомкнутых систем. При исследовании устойчивости замкнутой САУ рассматривается собственный оператор замкнутой системы:

$$W_3(s) = \frac{W_p(s)}{1 + W_p(s)} = \frac{\frac{K(s)}{D(s)}}{1 + \frac{K(s)}{D(s)}} = \frac{K(s)}{K(s) + D(s)}. \quad (6.9)$$

Собственный оператор замкнутой системы $D_3(s) = K(s) + D(s)$.

6.6. Частотный критерий устойчивости Найквиста

Иногда в практике возникает необходимость в анализе устойчивости замкнутой САУ по характеристикам разомкнутой ее части. Критерий Найквиста позволяет определить устойчивость замкнутой системы по виду АФЧХ разомкнутой системы.

$$W_3(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)}; \quad W(s) = \frac{K(s)}{D(s)}.$$

Для доказательства критерия Найквиста введем вспомогательную передаточную функцию

$$W^*(s) = 1 + W(s) = \frac{D(s) + K(s)}{D(s)}, \quad (6.10)$$

$W(s)$ – передаточная функция системы в разомкнутом состоянии;

$D_3(s) = D(s) + K(s)$ – собственный оператор замкнутой системы;

$D(s)$ – собственный оператор системы в разомкнутом состоянии.

Как правило, порядок оператора $K(s)$ меньше порядка собственного $D(s)$, поэтому порядки собственного оператора замкнутой системы и системы в разомкнутом состоянии совпадают.

Переходя в частотную область ($s=j\omega$), получим:

$$\begin{aligned} W^*(j\omega) &= \frac{D(j\omega) + K(j\omega)}{D(j\omega)} = \frac{(j\omega - r_1) + (j\omega - r_2) \dots (j\omega - r_n)}{(j\omega - r'_1)(j\omega - r'_2) \dots (j\omega - r'_n)} = \\ &= \frac{A_\Sigma(\omega)e^{j\varphi_\Sigma(\omega)}}{A'_\Sigma(\omega)e^{j\varphi'_\Sigma(\omega)}} = \frac{A_\Sigma(\omega)}{A'_\Sigma(\omega)} e^{j\Delta\varphi(\omega)}, \end{aligned}$$

$$\Delta\varphi(\omega) = \varphi_\Sigma(\omega) - \varphi'_\Sigma(\omega),$$

где r_1, r_2, \dots, r_n – корни уравнения $D_3(r) = 0$;

r'_1, r'_2, \dots, r'_n – корни характеристического уравнения $D(r) = 0$.

При анализе устойчивости замкнутой системы могут быть 2 случая:

- разомкнутая система устойчива;
- разомкнутая система неустойчива.

Рассмотрим случай, когда разомкнутая система устойчива. Будем изменять частоту от $-\infty$ до $+\infty$ и изобразим получившуюся амплитудно-фазовую частотную характеристику $W^*(j\omega)$ на комплексной плоскости (рис. 6.7,а). Рассмотрим результирующий угол поворота вектора $W^*(j\omega)$ при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$. Этот угол представляет собой изменение $\Delta\varphi$.

Числитель в выражении

$$W^*(j\omega) = \frac{D(j\omega) + K(j\omega)}{D(j\omega)} = \frac{D_3(j\omega)}{D(j\omega)} \quad (6.11)$$

представляет собой характеристический комплекс замкнутой системы. Для того чтобы система была устойчивой в замкнутом состоянии, необходимо изменение аргумента $D_3(j\omega)$ в диапазоне частот $\omega = 0 \dots \infty$, равное $n\frac{\pi}{2}$, где n – степень характеристического полинома. При изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$ аргумент $D_3(j\omega)$ изменится на величину $\varphi_\Sigma = \pi n$.

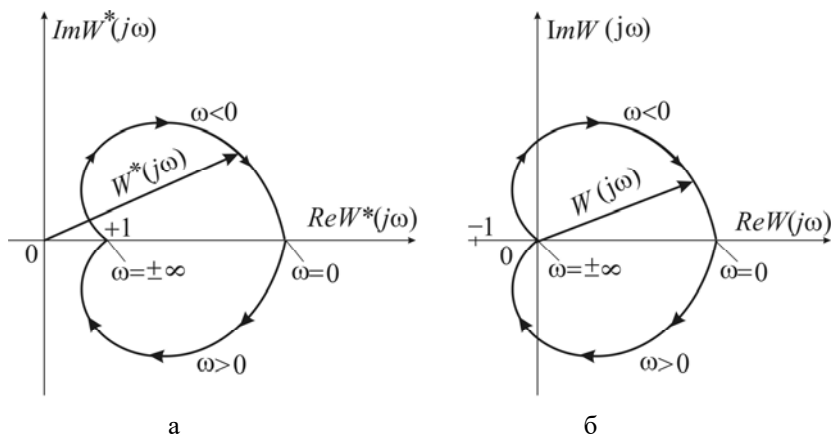


Рис. 6.7. Годографы вспомогательной частотной передаточной функции $W^*(j\omega)$ (а); АФЧХ 2-го рода разомкнутой системы (б)

Знаменатель в выражении (6.11) представляет собой характеристический комплекс разомкнутой системы той же степени n . Так как

рассматривается случай устойчивой разомкнутой системы, то результирующий угол поворота вектора $D_3(j\omega)$ при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$ будет равен $\varphi'_\Sigma = \pi n$.

Отсюда следует, что в данном случае результирующий угол поворота вектора $W^*(j\omega)$ будет равен нулю: $\Delta\varphi = \varphi_\Sigma - \varphi'_\Sigma = 0$. Это означает, что для устойчивой в замкнутом состоянии системы годограф вектора $W^*(j\omega)$ не должен охватывать начала координат (рис. 6.7,а).

Частотная функция $W(j\omega)$ разомкнутой системы отличается от вспомогательной функции $W^*(j\omega)$ на единицу. Поэтому можно строить амплитудно-фазовую частотную характеристику разомкнутой системы и по ее виду анализировать устойчивость замкнутой САУ. В этом случае амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы не должна охватывать точку с координатами $(-1; j0)$ (рис. 6.7,б).

Из доказанного следует формулировка критерия Найквиста: Для устойчивости замкнутой САУ, полученной замыканием устойчивой разомкнутой системы, необходимо и достаточно, чтобы АФЧХ разомкнутой системы не охватывала точку с координатами $(-1; j0)$.

На рис. 6.8 приведены примеры частотных характеристик разомкнутых систем, соответствующих устойчивым и неустойчивым замкнутым системам.

Вследствие симметрии ветвей (относительно действительной оси) обычно строят ветви АФЧХ, соответствующие аналитическому решению в диапазоне частот $-\infty < \omega < +\infty$.

Второй случай – разомкнутая система неустойчива.

Наличие неустойчивости системы в разомкнутом состоянии не означает, что система будет неустойчивой в замкнутом состоянии. Она может быть как устойчивой, так и неустойчивой. Однако формулировка критерия устойчивости Найквиста при этом несколько меняется. Пусть знаменатель передаточной функции разомкнутой системы $D(s)$ степени n содержит k корней с положительной вещественной частью.

Тогда при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$ аргумент $D(j\omega)$ повернется на угол $\varphi'_\Sigma = (n - 2k)\pi$.

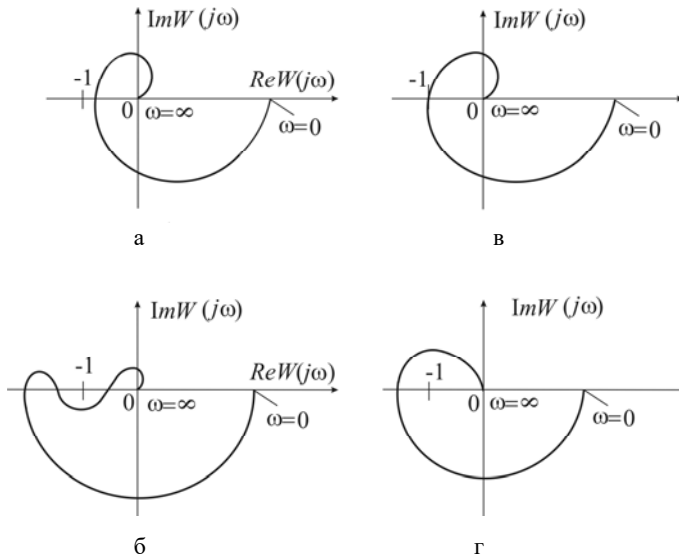


Рис. 6.8. АФЧХ разомкнутой системы и соответствующие ей АФЧХ замкнутой системы:

- а и б – устойчивым замкнутым и разомкнутым системам;
- в – системе на границе устойчивости;
- г – неустойчивой замкнутой системе

Для устойчивой замкнутой системы при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$ $\varphi_{\Sigma} = n\pi$. Следовательно, аргумент $W^*(j\omega)$ будет равен

$$\Delta\varphi(\omega) = n\pi - (n - 2k)\pi = k2\pi.$$

Это означает, что вектор годографа $W^*(j\omega)$ охватывает на комплексной плоскости начало координат в положительном направлении столько раз, сколько корней характеристического уравнения системы в разомкнутом состоянии находится в правой полуплоскости.

Итак, для устойчивости замкнутой системы, полученной замыканием неустойчивой разомкнутой системы, необходимо и достаточно, чтобы при изменении частоты от $-\infty$ до $+\infty$ АФЧХ разомкнутой системы охватывала в положительном направлении точку с координатами $(-1; j0)$ столько раз, сколько положительных корней имеется в характеристическом уравнении, соответствующем разомкнутой си-

стеме (рис. 6.9). При изменении ω от 0 до $+\infty$ годограф АФЧХ 2-го рода должен охватывать точку $(-1; j0)$ $\frac{k}{2}$ раз.

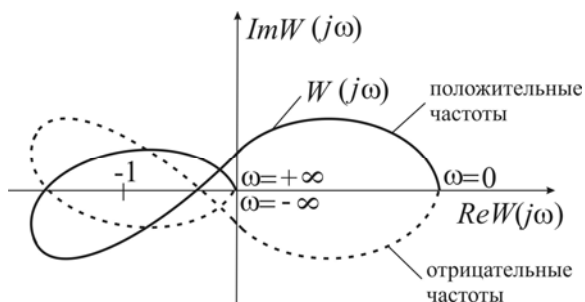


Рис. 6.9. Вид годографа неустойчивой разомкнутой системы для случая, когда замкнутая система устойчива (в характеристическом уравнении разомкнутой САУ – два корня с положительной вещественной частью)

Таким образом, при использовании критерия Найквиста, вообще говоря, необходимо убедиться в том, имеются ли в знаменателе передаточной функции разомкнутой системы корни, лежащие в правой полуплоскости (корни с положительной вещественной частью) и сколько имеется таких корней.

Следует заметить, что в практике желательно избегать второго случая, т.е. необходимо использовать только устойчивые в разомкнутом состоянии системы.

Это объясняется тем, что если система в разомкнутом состоянии неустойчива, то при ее замыкании и имеющихся в реальной системе нелинейностях на некоторых режимах может произойти нарушение устойчивой работы и возникновение автоколебаний.

Для решения многих инженерных задач обеспечения устойчивости используют частный случай критерия Найквиста.

6.7 Качество процессов управления

6.7.1 Критерии и способы оценки качества

Устойчивость является необходимым, но недостаточным условием работоспособности линейной САУ.

Устойчивость означает, что переходные составляющие процессов затухают. Для практики этого мало. Поэтому возникают определенные требования к времени затухания переходных составляющих, характеру реакции системы на управляющие и возмущающие воздействия, к точности воспроизведения входных сигналов и величинам ошибок, вызванных действием возмущений. Все эти стороны работоспособности САУ обобщаются понятием «качество регулирования». Качество регулирования оценивается рядом показателей. Выбор того или иного показателя для оценки работоспособности системы зависит от назначения и условий работы системы. К основным показателям относятся статическая ошибка, ошибка по скорости и ускорению, а также показатели качества переходного процесса.

К показателям качества работы САУ относятся также ошибки в установившихся вынужденных режимах, причем функции воздействия на систему $y_{\text{пр}}(t)$ и $f(t)$ являются медленно меняющимися функциями времени в сравнении с переходными функциями. Частным и важным случаем медленно меняющихся воздействий являются постоянные воздействия, т.е. случаи, когда $y_{\text{пр}}(t), f(t) = \text{const}$. Для следящих систем, кроме того, важны медленно меняющиеся входные сигналы вида $y_{\text{пр}}(t) = y_{\text{пр}0} t^k$ (где $k=1,2$ и реже 3), а также синусоидальные сигналы $y_{\text{пр}}(t) = y_{\text{пр}} \sin \omega t$, причем в последнем случае ω должна лежать в полосе частот пропускания системы.

Критерием точности системы в установившемся режиме является значение ошибки, при этом важны как ошибка воспроизведения регулируемого параметра, так и ошибка, вызванная действием возмущения. По своей природе как управляющие воздействия $y_{\text{пр}}(t)$, так и возмущения $f(t)$ – случайные функции времени и как таковые могут быть заданы своими вероятностными характеристиками. В связи с этим возникает проблема вероятностной оценки ошибки по известным вероятностным характеристикам воздействий и известной динамической структуре системы. Вероятностные критерии точности САУ разработаны сравнительно недавно.

6.7.2 Качество переходных процессов в САУ. Показатели качества переходных процессов

Качество переходного процесса определяется по графику изменения выходной величины во времени при подаче в систему скач-

кообразного (ступенчатого) возмущения. В понятие качества переходного процесса входят: быстроедействие, колебательность, перерегулирование.

Быстроедействие оценивается двумя параметрами (рис.6.10):

1. Время (первого) согласования τ – время, в течение которого система, находящаяся под действием ступенчатого возмущения, впервые достигает согласованного положения.
2. Время переходного процесса t_n – отрезок времени, в течение которого выходная величина попадает в зону или интервал Δ погрешности относительно своего нового установившегося значения.

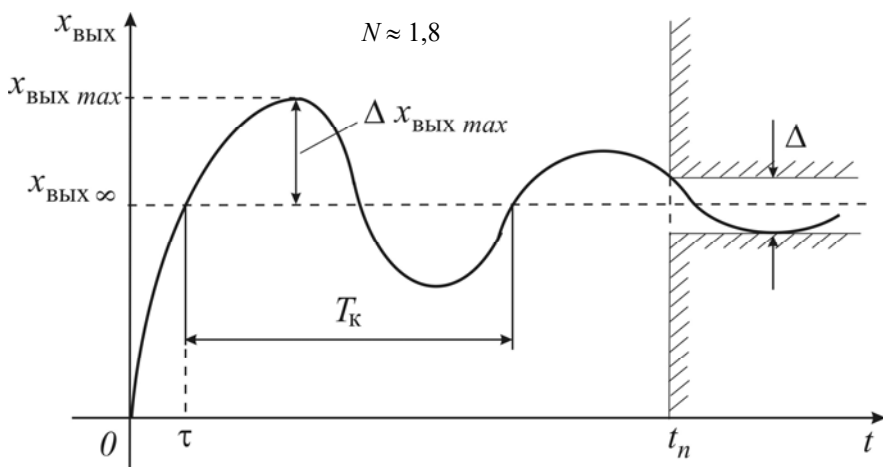


Рис. 6.10. Показатели качества переходного процесса

Величина Δ зависит от требований к точности работы САУ. Этой точностью определяется и величина t_n . Обычно $\Delta \leq 5\%$ от $x_{ВЫХ}(\infty)$.

Для монотонного переходного процесса $\tau = t_n$.

Колебательность определяется числом колебаний N за время переходного процесса t_n . N может быть дробным:

$$N \cong \frac{t_n}{T_k}, \quad (6.12)$$

где T_k – “период” колебаний.

Частота колебаний

$$f_k = \frac{\omega_k}{2\pi} = \frac{1}{T_k}.$$

Колебания, возникающие в системе, приводят к износу механизмов, увеличивают время переходного процесса и являются нежелательными. В авиационных двигателях во время переходного процесса допускается не более 2...3 колебаний.

Перерегулирование – наибольший заброс в сторону, противоположную начальному рассогласованию (относительно установившегося значения) (рис.6.10):

$$\alpha = \frac{x_{\text{ВЫХ max}}}{x_{\text{ВЫХ}}(\infty)}.$$

При проектировании САУ стремятся обеспечить минимальное значение τ . Это приводит к тому, что система становится быстродействующей с большим перерегулированием.

Допустимая величина $x_{\text{ВЫХ max}}$ зависит от максимальных допустимых динамических напряжений, температурных условий в узлах двигателя.

В реальных системах желательно стремиться к тому, чтобы α и t_n были минимальны.

Построение САУ, удовлетворяющей заданным показателям качества переходного процесса, представляет достаточно трудоемкую инженерную задачу. Для анализа влияния конструктивных и эксплуатационных параметров систем на качество переходного процесса требуется построить серию кривых переходных процессов. Построение переходного процесса может быть выполнено точными методами для систем невысокого порядка и приближенными методами для нелинейных систем и систем высокого порядка. К приближенным методам относятся метод численного интегрирования дифференциальных уравнений на ЭЦВМ и частотные методы. Выбор параметров САУ на основе построения серии переходных характеристик представляет собой трудоемкий процесс, и в общем случае невозможно установить аналитическую зависимость между параметрами системы и показателями качества переходного процесса. Поэтому для связи параметров САУ с показателями качества переходного процесса в ТАУ введены косвенные оценки. Эти оценки связаны, с

одной стороны, с параметрами САУ, а с другой – с показателями качества переходного процесса. Существуют несколько косвенных оценок качества переходного процесса: оценка по распределению корней характеристического уравнения; оценка по вещественным частотным характеристикам САУ; интегральные оценки. Ниже будут рассмотрены вопросы выбора параметров САУ с использованием этих косвенных оценок переходного процесса.

6.7.3 Определение параметров САУ по распределению корней характеристического уравнения

Метод определения параметров САУ по распределению корней характеристического уравнения в основном применяется для систем с передаточной функцией вида

$$W(s) = \frac{k}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n}. \quad (6.13)$$

Корни характеристического уравнения данной системы, расположенные определенным образом на левой полуплоскости корней, полностью определяют качество переходного процесса в системе. Так как трудно анализировать влияние каждого корня на качество переходного процесса и на основе этого выбирать параметры системы управления, вводят косвенные оценки распределения корней характеристического уравнения: степень устойчивости δ и колебательность μ (рис. 6.11).

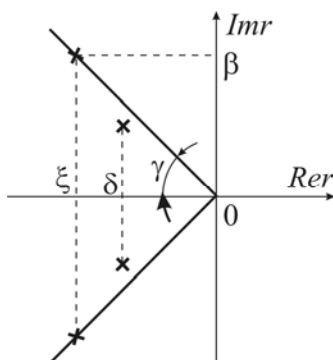


Рис. 6.11. Определение качества переходного процесса по расположению корней характеристического уравнения

Для определения параметров САУ с использованием этого метода сначала необходимо выяснить, с одной стороны, связь этих оценок с распределением корней характеристического уравнения на комплексной плоскости корней, а следовательно и с параметрами системы, а с другой стороны – связь этих оценок с показателями качества переходного процесса.

Степень устойчивости δ САУ представляет собой модуль вещественной части корня, наиболее близко расположенного к мнимой оси комплексной плоскости корней $\delta = |\operatorname{Re} r_i|_{\min}$. Величина δ характеризует длительность переходного процесса. Корни с наименьшей по абсолютной величине вещественной частью дают в переходном процессе составляющие, которые затухают медленнее других.

Оценивая приближенно длительность переходного процесса только по ближайшему к мнимой оси корню, получим:

$\Delta y_i(t) = c_i e^{-\delta t}$ – в случае вещественного корня

$$\text{и } \Delta y_{i,i+1}(t) = A_i e^{-\delta t} \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (6.14)$$

– в случае комплексно-сопряженных корней.

Если за время регулирования τ_p составляющая $\Delta y_i(\tau_p)$ (в случае вещественного корня) примет значение $\Delta y_i(\tau_p) = \varepsilon c_i$, то длительность процесса определится из равенства $\varepsilon c_i = c_i e^{-\delta \tau_p}$ и будет равна

$$\tau_p = \frac{1}{\delta} \ln \frac{1}{\varepsilon}, \quad (6.15)$$

где ε – величина, показывающая во сколько раз уменьшается выходная величина за время регулирования.

К аналогичному соотношению можно прийти, рассматривая $\Delta y_i(\tau_p)$ для случая комплексных корней.

Колебательность системы управления μ определяется как тангенс угла, образованного осью абсцисс и прямой, проведенной из начала координат к точке, соответствующей корню, при проведении прямой через который этим углом охватываются все корни в одной из четвертей левой полуплоскости корней, то есть $\mu = \operatorname{tg} \mu$ (см. рис. 6.11).

Колебательность μ характеризует перерегулирование и скорость затухания колебаний во время переходного процесса в системе.

Действительно, наличие среди корней характеристического уравнения комплексно-сопряженных корней предопределяет колебательный характер переходного процесса, причем колебательная составляющая затухает по закону (6.9).

Определим затухание амплитуды колебаний за один период $T = \frac{2\pi}{\omega_i}$. В некоторый момент времени $t = t_1$ эта амплитуда равна $A_1 = c_i e^{-\alpha_i t_1}$, а через один период – $A_2 = c_i e^{-\alpha_i(t_1 + 2\pi/\omega_i)}$. Затухание амплитуды колебаний за период равно

$$\xi = \frac{A_1 - A_2}{A_1} = 1 - e^{2\pi\alpha_i/\omega_i}$$

или

$$\xi = 1 - e^{-\frac{2\pi}{\mu}}. \quad (6.16)$$

Обычно затухание выражают в процентах $\xi = \left(1 - e^{-\frac{2\pi}{\mu}}\right) \cdot 100\%$.

Из равенства (6.11), задавшись степенью затухания ξ , можно определить колебательность

$$\mu = \frac{2\pi}{\ln \frac{1}{1 - \xi}}. \quad (6.17)$$

В САУ требуемое затухание колебаний за период составляет (90...98)%. Например, если $\xi = 98\%$, то допустимая колебательность $\mu \approx 1,5$, а при $\xi = 90\%$ $\mu \approx 2,7$. Таким образом, чем меньше затухание ξ , тем больше колебательность μ .

Задавая значение τ_p и ξ , можно определить по формулам (6.15) и (6.17) косвенные оценки δ и μ качества переходного процесса в САУ. Для определения параметров системы необходимо связать их с δ и μ . Для этого разработаны специальные методы, с использованием которых по заданному собственному оператору $D(s)$ системы находятся уравнения связи δ и μ с коэффициентами a_0, a_1, \dots, a_n , т. е. фактически с физическими параметрами САУ. Достаточно точные результаты получаются для систем с уравнением невысокого порядка. Например, И.А. Вышнеградским составлены такие уравнения для системы третьего порядка ($n = 3$) и построены номограммы в плоскости безразмерных комплексов A и B

для серий $\delta = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$. Так как при построении диаграммы И.А. Вышнеградского исходное уравнение приводилось к безразмерной форме, то относительная степень устойчивости равна

$$\bar{\delta} = \delta \sqrt[3]{\frac{a_0}{a_3}},$$

а колебательность – величина безразмерная, т. е. $\bar{\mu} = \mu$.

6.7.4 Оценка качества переходного процесса по амплитудно-частотным характеристикам

При оценке качества переходного процесса по амплитудно-частотным характеристикам рассматривается АЧХ системы. Наличие разрыва на АЧХ указывает на неустойчивость системы или на ее высокую добротность (рис. 6.12,а).

Уменьшение пика характеризует уменьшение числа колебаний в переходном режиме. При наличии на характеристике нескольких пиков наибольшее влияние на переходный процесс оказывает первый максимум.

Величина

$$\frac{A_{\max} - A_0}{A_0}$$

носит название показателя колебательности (A_0 – амплитуда при $\omega = 0$) (рис. 6.12,б).

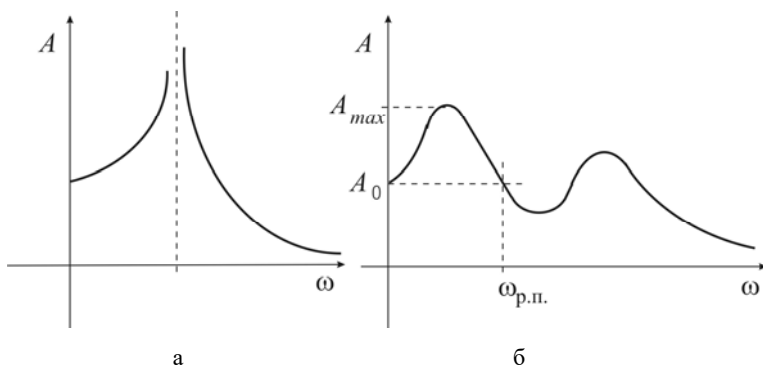


Рис. 6.12. Амплитудно-частотная характеристика САУ

В практике считаются работоспособными системы, у которых показатель колебательности $\leq 0,3 \div 0,4$.

Быстродействие системы характеризуется полосой равномерного пропускания частот. Ширина полосы равномерного пропускания частот определяется той частотой $\omega_{\text{рп}}$, при которой амплитуда становится равной значению амплитуды при $\omega = 0$ (рис.6.12,б).

Чем шире полоса, тем быстродействие лучше. Связь времени переходного процесса с частотой равномерного пропускания определяется $t_n \cong \frac{2\pi}{\omega_{\text{рп}}}$.

6.7.5 Интегральные оценки качества переходного процесса

С увеличением порядка дифференциальных уравнений САУ более трудно анализировать качество переходного процесса. Для этого случая в ТАУ введены интегральные оценки, при использовании которых можно выбирать параметры САУ, соответствующие минимальному времени переходного процесса.

Как уже известно, переходный процесс был бы идеальным, если бы в момент возникновения управляющего воздействия регулируемый параметр принимал бы мгновенно новое установившееся значение и не изменялся до возникновения нового воздействия. В реальном процессе это невозможно. Отличие реального процесса от идеального тем больше, чем больше площадь, заключенная между кривыми этих процессов (рис. 6.13). Степень отличия реального и идеального переходных процессов оценивается интегральными оценками.

Простейшей интегральной оценкой является

$$I_0 = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) dt, \quad (6.18)$$

где $\varepsilon(t) = y_{\infty} - y(t)$ – отклонение регулируемого параметра от нового установившегося значения. Геометрически I_0 выражает площадь под кривой переходного процесса, построенного по отклонению. Заштрихованная площадь будет тем меньше, чем меньше величина отклонения $\varepsilon(t)$ и быстрее затухает переходный процесс. Следовательно, чем меньше I_0 , тем лучше переходный процесс в САУ. Рассмотрим выбор параметров САУ на основе интегральной оценки I_0 .

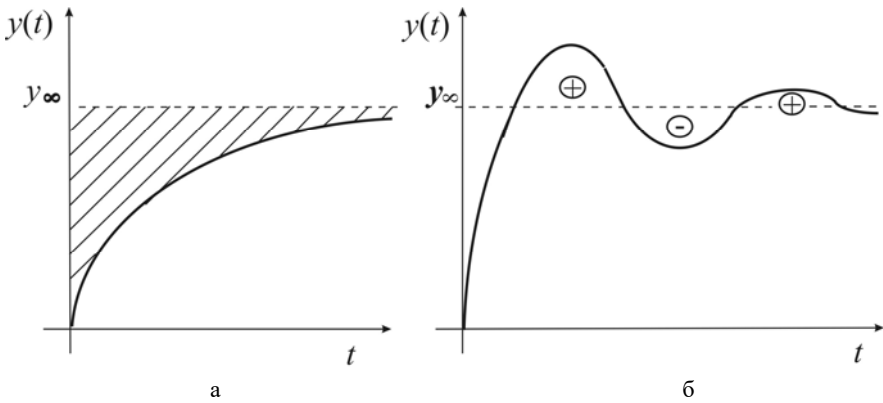


Рис. 6.13 Графики переходных процессов

Пусть передаточная функция замкнутой САУ имеет вид

$$W_{\text{зам}}(s) = \frac{\tilde{y}}{\tilde{x}} = \frac{b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_m}{a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + b_n} = \frac{K(s)}{D(s)}.$$

Изображение регулируемого параметра определяется по формуле

$$\tilde{y} = \frac{K(s)}{D(s)} \tilde{x}.$$

Так как $\varepsilon(t) = y_\infty - y(t)$, то соответствующее выражение для $\tilde{\varepsilon}$ в изображениях по Лапласу запишется в виде

$$\tilde{\varepsilon} = \tilde{s}_{s=0} - \tilde{y},$$

где $\tilde{y}_{s=0} = \frac{K(0)}{D(0)} \tilde{x}$ - изображение по Лапласу y_∞ .

Подставляя выражения \tilde{y} и $\tilde{y}_{s=0}$ в формулу для $\tilde{\varepsilon}$, получим

$$\tilde{\varepsilon} = \left[\frac{K(0)}{D(0)} - \frac{K(s)}{D(s)} \right] \tilde{x} = \left[\frac{b_m}{a_n} - \frac{K(s)}{D(s)} \right] \tilde{x}.$$

Так как рассматривается переходный процесс при единичном ступенчатом входном воздействии, то $\tilde{x} = \frac{1}{s}$ и изображение отклонения регулируемого параметра запишется в виде

$$\tilde{\varepsilon} = \frac{b_m D(s) - a_n K(s)}{a_n D(s)} \cdot \frac{1}{s}.$$

Интеграл I_0 можно представить в виде

$$I_0 = \lim_{s \rightarrow 0} \int_0^{\infty} \varepsilon(t) e^{-st} dt = \lim_{s \rightarrow 0} \tilde{\varepsilon},$$

так как $\tilde{\varepsilon} = \int_0^{\infty} \varepsilon(t) e^{-st} dt$.

Из последнего равенства для I_0 следует

$$\begin{aligned} I_0 &= \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{b_m D(s) - a_n K(s)}{a_n D(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) = \\ &= \lim_{s \rightarrow 0} \frac{b_m \left[a_0 s^{n-1} + a_1 s^{n-2} + \dots + \frac{a_m}{s} \right] - a_n \left[b_m s^{m-1} b_{m-1} s^{m-2} + \dots + \frac{b_m}{s} \right]}{a_n [a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_n]}. \end{aligned}$$

Вычислив данный предел, получим

$$I_0 = \frac{b_m a_{n-1} - b_{m-1} a_n}{a_n^2}.$$

Пусть, исходя из минимума интегральной оценки, требуются два каких-нибудь параметра θ и γ САУ. Эти параметры входят в коэффициенты $a_0 \dots a_n$ и $b_0 \dots b_m$. Для определения θ и γ , удовлетворяющих минимальному времени переходного процесса, выражают I_0 в функции от θ и γ в явном виде, т. е. $I_0(\theta, \gamma)$. Затем вычисляют частные производные по θ и γ и приравнивают их нулю. В результате получают два уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial I_0(\theta, \gamma)}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\partial I_0(\theta, \gamma)}{\partial \gamma} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

с двумя неизвестными θ и γ . Функция I_0 не всегда имеет экстремум по рассматриваемым параметрам. Тогда нужно выбирать их по наименьшему значению I_0 из области изменени θ и γ , назначаемой из других соображений. При выбранных таким образом параметрах может оказаться так, что система регулирования, вначале удовлетво-

рившая заданному запасу устойчивости, станет неудовлетворительной. Тогда уточняют значения θ и γ таким образом, чтобы система не оказалась слишком близкой к границе устойчивости. Также уточнения можно произвести построением диаграмм в плоскости двух параметров, полученных для различных $I_0 = \text{const}$. Оценка качества переходного процесса и выбор параметров САУ по интегральной оценке I_0 применимы лишь при заведомо монотонных (без колебаний) процессах. Если имеет место колебательный переходный процесс (см. рис. 6.13,б), то при вычислении интеграла I_0 площади отклонений от идеального переходного процесса будут складываться алгебраически и наименьшему значению I_0 может соответствовать длительный колебательный процесс.

В этих случаях применяется квадратичная интегральная оценка

$$I_1 = \int_0^{\infty} \varepsilon^2(t) dt. \quad (6.19)$$

Параметры САУ выбираются из условия обеспечения $(I_1)_{\min}$. Для этого находится выражение, связывающее I_1 с коэффициентами $a_0 \dots a_n, b_0 \dots b_m$. Например, для систем с $m < n$ это выражение имеет вид:

$$I_1 = \frac{1}{2a_n^2 \Delta} (B_m \Delta_m + B_{m-1} \Delta_{m-1} + \dots + B_0 \Delta_0) - \frac{b_m b_{m-1}}{a_n^2}, \quad (6.20)$$

где

$$\Delta = \left| \begin{array}{ccc|c} a_n & -a_{n-2} & a_{n-4} & 0 \\ 0 & -a_{n-1} & a_{n-3} & 0 \\ 0 & -a_n & a_{n-2} & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & a_1 \end{array} \right| \quad (6.21)$$

$$\left. \begin{array}{l} B_m = b_m^2; \\ B_{m-1} = b_{m-1}^2 - 2b_m b_{m-2}, \\ B_k = b_k^2 - 2b_{k+1} b_{k-1} + 2b_{k+2} b_{k-2} + 2(-1)^k b_m b_{2k-m}, \\ B_0 = b_0^2 \end{array} \right\}. \quad (6.22)$$

Определители $\Delta_k (k = 0, m-1, \dots, 0)$ в формуле (6.20) находятся по (6.21) путем замены $(m - k + 1)$ -го столбца столбцом

$$\begin{matrix} a_{n-1} \\ a_n \\ 0 \\ 0 \end{matrix}$$

В определителе (6.21) заменяются нулями все буквы с индексами меньше нуля и больше n , а в формуле (6.22) – с индексами меньше нуля и больше m . Выбор параметров САУ, исходя из обеспечения $(I_1)_{\min}$, может осуществляться аналогично удовлетворению условия $(I_0)_{\min}$.

Как следует из (6.19), величина I_1 не зависит от знака отклонения $\varepsilon(t)$, а значит и от формы переходного процесса (монотонного или колебательного). Однако как показали расчеты, если выбирать параметры САУ из условия минимума I_1 , то переходный процесс получается чрезмерно колебательным. Это связано с тем, что оценка I_1 учитывает только величину отклонения $\varepsilon(t)$ и время затухания и никак не учитывает скорость изменения $\dot{\varepsilon}(t)$. Если, например, подать на вход системы единичный скачок, то ошибка в переходном процессе определится заштрихованной частью на рис. 6.14,а.

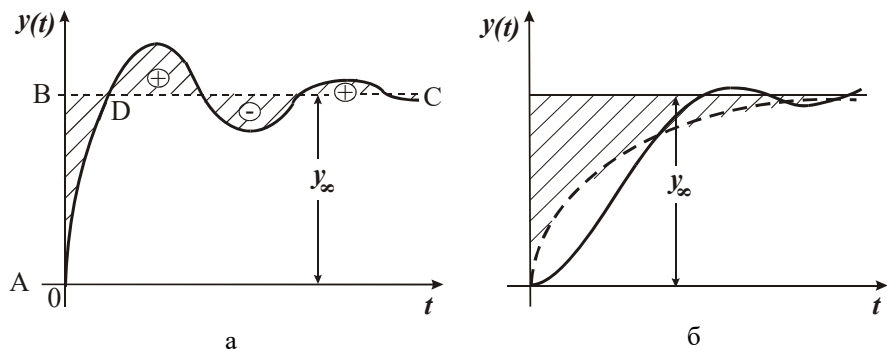


Рис. 6.14. К вопросу об интегральных оценках качества

Очевидно, что величина интегральной оценки (6.19) будет тем меньше, чем ближе будет кривая переходного процесса к ломаной линии ABC. Но приближение процесса к этой линии требует увеличения угла наклона кривой к начальной стадии процесса (приближение части кривой AD к отрезку AB). Увеличение же начальной скорости может вызвать значительное перерегулирование и, следовательно, малый запас устойчивости. Поэтому была введена другая, так называемая улучшенная квадратичная оценка

$$I_2 = \int_0^{\infty} [\varepsilon^2(t) + T^2 \dot{\varepsilon}^2(t)] dt. \quad (6.23)$$

6.8 Лабораторные исследования устойчивости движения и качества процессов управления

Цель лабораторных исследований

Приобретение практических навыков оценки устойчивости систем автоматического управления с использованием ПО Matlab-SimuLink.

Объекты исследований

Математические модели гидромеханических систем управления частотой вращения ротора ГТД, которые описаны и изучались в главе 4 настоящего пособия.

Порядок выполнения работы

1. В папке Санчугов АСЭУ → Устойчивость САУ размещены модели гидромеханических систем управления:
 - в папке I – модель с регулятором прямого действия;
 - в папке II – модель с астатическим регулятором непрямого действия;
 - в папке III – модель с регулятором с гибкой обратной связью.

Здесь же помещен теоретический материал по изучению основ устойчивости движения механизмов, выполненный в формате Word.

Общий вид папки представлен на рис. 6.18.

При открытии модели на мониторе появляются три изучаемые системы управления (рис. 6.19).

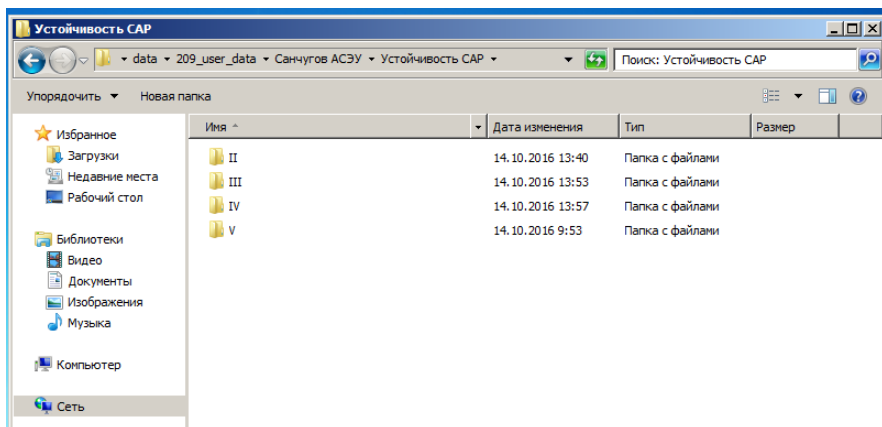


Рис. 6.18 Общий вид папки по изучению основ устойчивости

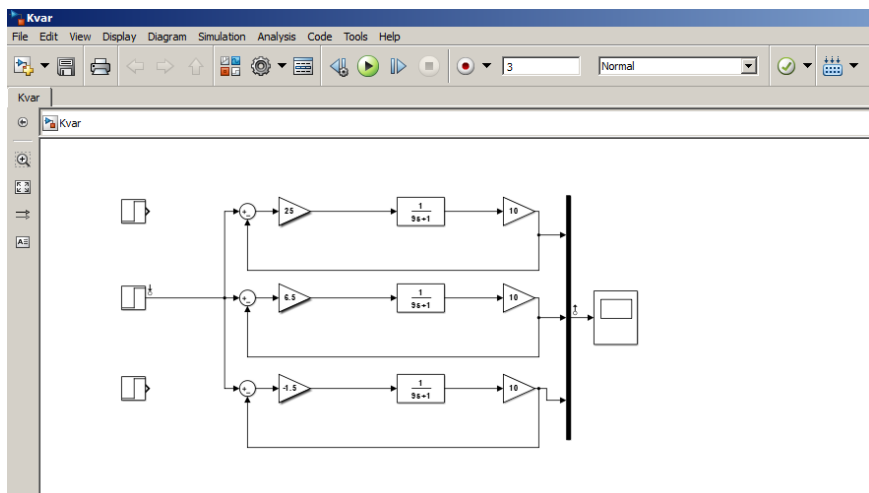


Рис. 6.19. Пример математической модели для изучения устойчивости движения механизмов

- В открывшейся модели необходимо установить численные индивидуальные значения коэффициентов T_g и K_{nG} , заданные преподавателем. После этого с использованием меню панели инструментов активировать функцию Analysis (ана-

лизы) – Control Design (конструкция управления), активируется панель Linear Analysis Tool (линейный инструмент анализа). На панели в разделе EXACT LINEARIZATION появляется панель Linear Analysis (рис. 6.20), на которой после активации кнопки Plot Result (графические результаты расчетов) появляются символные обозначения и назначения видов линейного анализа.

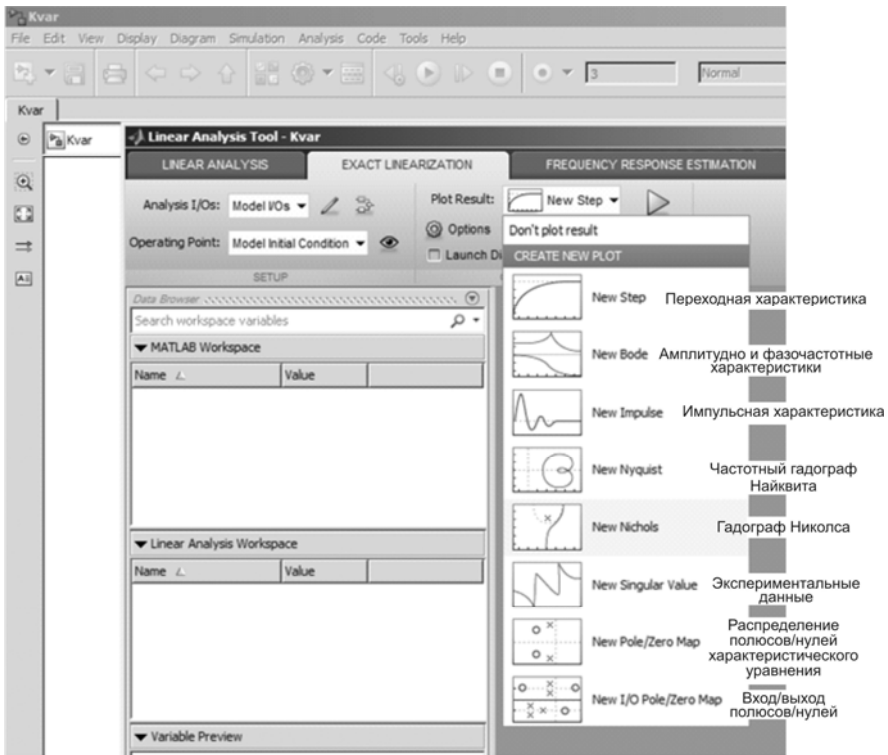


Рис. 6.20. Виды функций линейного анализа систем

3. Последовательно открывая, провести расчеты переходных, амплитудно- и фазочастотных характеристик, построения годографов Найквита и Николса, распределения полюсов и нулей характеристического уравнения систем управления:

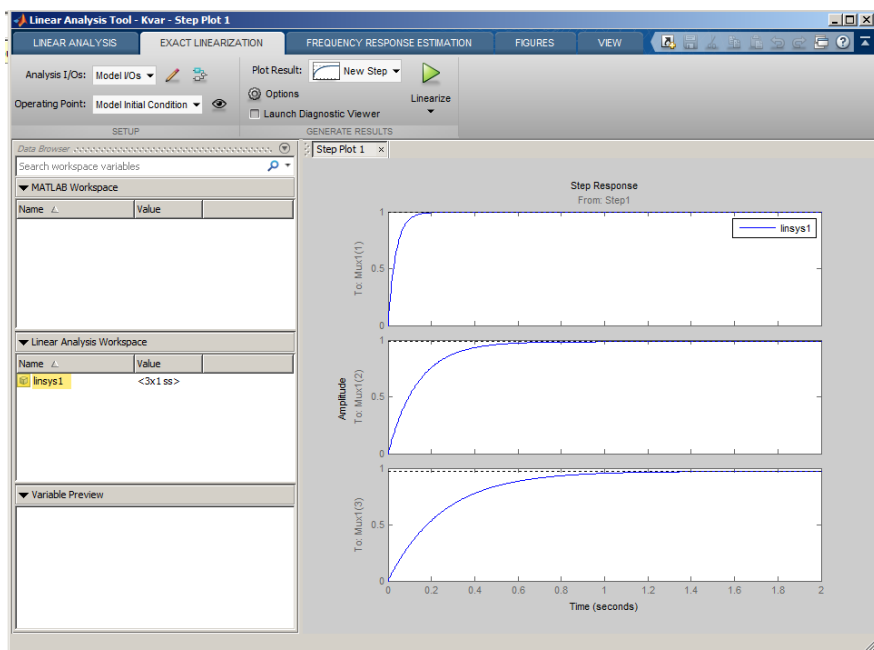


Рис. 6.21. Пример расчетов переходных характеристик изменения частоты вращения двигателя с различными регуляторами

- по виду переходных характеристик (рис. 6.21) при различных коэффициентах усиления регуляторов и обратных связей определить качественные параметры устойчивости. При этом обратить внимание на вид переходных характеристик, наличие статических ошибок управления, быстродействия САУ и другие параметры;
- по виду частотных характеристик определить особенности протекания характеристик при изменении частоты колебаний от 0 до ∞ , связь протекания переходных и частотных характеристик, по длительности переходных процессов и скорости затухания колебаний, резонансных режимах т.д.;
- оценить устойчивость изучаемых систем по виду годографов Найквиста и Николса путем сравнения их при различных коэффициентах регуляторов;

- оценить устойчивость и качество процессов управления по распределению корней уравнений, оценить запасы устойчивости изучаемых систем управления (рис. 6.22).

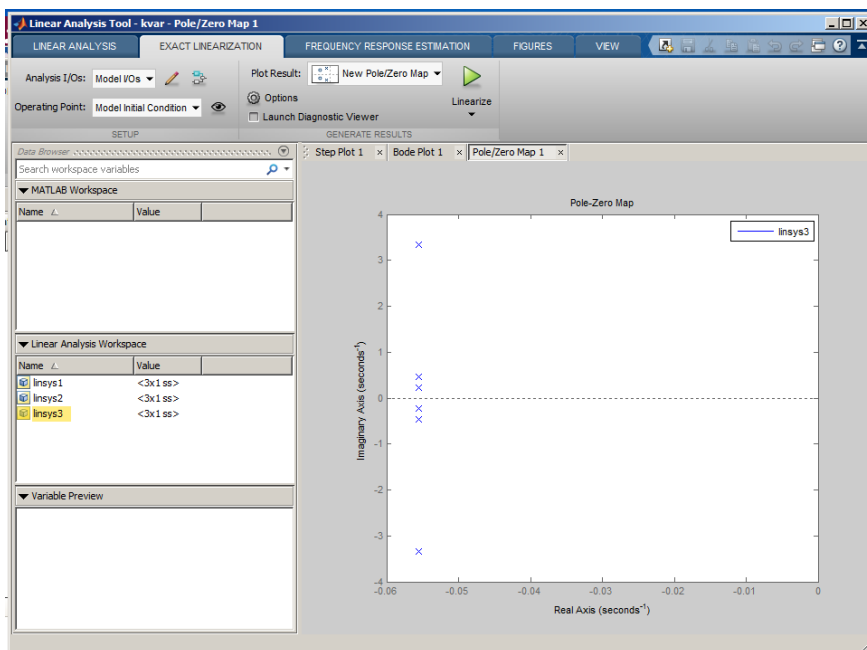


Рис. 6.22. Пример результатов расчетов, корней характеристических уравнений системы уравнения для анализа устойчивости движения

Отчет по выполненным лабораторным исследованиям должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Цель выполнения исследований.
3. Схему и работу исследуемой системы управления частотой вращения ротора двигателя.
4. Результаты расчетов динамических характеристик исследуемой системы.
5. Анализ выполненных расчетов, оценки устойчивости и качества управления частотой вращения ротора газотурбинного двигателя с заданными параметрами.

Часть 2

ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИМИ АГРЕГАТАМИ (ГПА) МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Магистральный транспорт природного газа имеет огромное значение для мировой экономики. Только на территории нашей страны транспортировку газа осуществляют более тысячи ГПА. При этом по одному трубопроводу транспортируется поток газа, энергия которого близка к мощности всех гидроэлектростанций Енисея и Ангары вместе взятых.

Современный ГПА – это сложнейшая энергетическая установка [12], основу которой составляют газотурбинный двигатель [13] и центробежный нагнетатель газа [14].

В составе ГПА используются такие основные системы:

- устройства и системы воздухообеспечения, очистки и подогрева входящего потока воздуха;
- системы автоматического управления и защиты двигателя;
- системы антипомпажной защиты нагнетателя;
- системы электро- и маслоснабжения;
- системы противопожарной автоматики и пожаротушения;
- система утилизации тепла и др.

7 СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕМ ГПА

Регулятор, управляющий подачей топлива в двигатель, может осуществлять непосредственное управление (изменение какого-то параметра по определенной программе) и управление по замкнутому принципу с обратной связью. Основным является регулирование по

принципу отрицательной обратной связи, при котором разность заданного и фактического значений параметра подается на вход ПИД-регулятора и после преобразования – на исполнительный орган – дозатор топлива. Непосредственное (разомкнутое) управление используется только при пуске и аварийном останове по программе нормального останова. На рис. 7.1 представлена структурная схема системы управления двигателем ГПА.

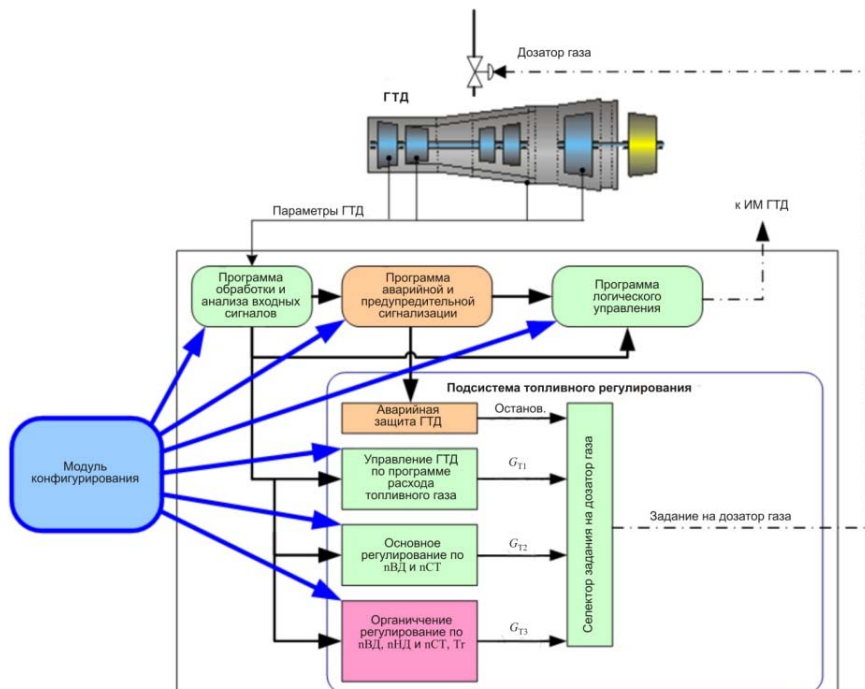


Рис. 7.1. Структурная схема системы управления двигателем ГПА

Программа обработки и анализа входных сигналов производит диагностику исправности каналов измерения, анализ достоверности аналоговых параметров, их математическую фильтрацию.

Программа аварийной и предупредительной сигнализации сравнивает контролируемые параметры с их аварийными и предупредительными значениями и, при необходимости, выдает задание на аварийный останов ГТД.

Модуль конфигурирования служит для привязки регулятора к типу двигателя, позволяет осуществлять настройку без изменения программного кода регулятора.

В состав регулятора входят следующие контуры, регулирующие ПИД-законы регулирования:

- контур $nВД$;
- контур $nНД$;
- контур $nСТ$;
- контур температуры газов за турбиной.

При работе регулятора топлива переход с контура на контур осуществляется путем выбора контура селектором задания на дозатор газа – селектор минимума для верхних ограничительных контуров и селектор максимума для нижних ограничительных и регулирующих контуров. Ниже приведен список контуров ограничения:

- 1) верхнее ограничение температуры газов за турбиной;
- 2) верхнее ограничение $nСТ$;
- 3) верхнее ограничение $nВД$;
- 4) верхнее ограничение $nНД$;
- 5) нижнее ограничение $nСТ$;
- 6) нижнее ограничение $nНДпр$;
- 7) рабочий контур $nСТ$ (или $nВД$).

Выходом любого контура регулирования является задание на расход топливного газа через дозатор.

7.1 Описание топливного регулятора [15]

Система топливного регулирования предназначена для управления автоматическим пуском и остановом двигателя, управления частотами вращения турбин двигателя на рабочем режиме в соответствии с заданием оператора или управляющим сигналом от САУ верхнего уровня, предотвращения возникновения аварийных ситуаций путем ограничения при необходимости подачи топлива в камеру сгорания двигателя.

Цель управления заключается в стабилизации определенных параметров двигателя при одновременном контроле нахождения значений других параметров в заданных диапазонах. Для достижения этой цели в системе используется соответствующий набор контуров регулирования, каждый из которых служит для контроля одного параметра. При пуске двигателя может осуществляться программное управление, управление по обратной связи с использова-

нием определенного набора контуров, а также любая комбинация этих способов.

Структура регулятора

Регулятор состоит из совокупности управляющего и ограничительных контуров, каждый из которых представляет собой контур отрицательной обратной связи с ПИ- или ПИД-законом регулирования. Управляющий контур служит для поддержания заданной величины одного из параметров двигателя, как правило, частоты вращения ротора высокого давления ($n_{ВД}$). Ограничительные контуры предназначены для предупреждения аварийных ситуаций путем удержания некоторых параметров в заданном диапазоне.

Двигатель является многосвязным объектом, имеющим один управляющий вход (положение дозатора топлива) и много выходов. Для управления таким объектом применен регулятор с общим интегратором и селектором минимума/максимума (рис. 7.2).

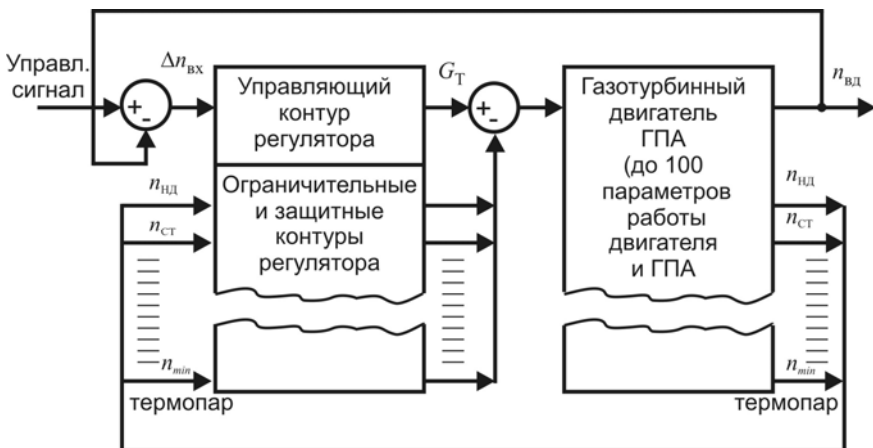


Рис. 7.2. Структурная схема системы управления с общим интегратором

В такой структуре легко реализуется плавное переключение контуров регулирования и ограничений, а сами контуры имеют одинаковый приоритет. При работе регулятора переход с контура на контур осуществляется автоматически с помощью селектора минимума/максимума. Для регулирующих и верхних ограничительных контуров в качестве активного выбирается тот контур, выход которо-

го имеет минимальное значение. Для нижних ограничительных контуров выбирается контур, выход которого максимален.

Задание на ограничительный контур формируется в соответствии с величиной аварийной уставки для каждого параметра. Например, для верхнего ограничения по частоте вращения КВД в качестве задания на верхний ограничительный контур по частоте вращения КВД берется значение несколько меньшее, чем верхняя аварийная уставка. Величины ограничений задаются при помощи конфигулятора топливного регулирования.

7.2 Работа регулятора

Топливный регулятор реализован в виде программного модуля в составе ПО САУ ГПА, выполняющего следующие основные функции:

- контроль достоверности и обработка значений входных физических величин, поступающих с драйверов ввода-вывода;
- управление подачей топлива на запуске, останове и на рабочем режиме;
- ограничение значений переменных, характеризующих работу ГПА (температуры газов перед СТ, частоты вращения СТ, КВД и КНД), с целью недопущения выхода за границы предупредительных значений;
- аварийная защита двигателя путем формирования команды на аварийный останов в случае выхода значений ограничиваемых величин (температуры газов перед СТ, частоты вращения СТ, КВД и КНД) за границу аварийных значений;
- контроль работы топливного клапана. В случае неисправности последнего формируется команда на аварийный останов агрегата;
- контроль перекоса температурного поля газов на входе СТ;
- контроль наличия горения в камере сгорания. При диагностировании погасания факела производится аварийный останов.

Работу топливного регулятора можно условно разбить на несколько режимов: «РЕЗЕРВ», «ПУСК», «РАБОТА», «НОРМАЛЬ-

НЫЙ ОСТАНОВ», «СТОП». Переходы между режимами осуществляются в определенном порядке по сигналам логической программы или регулятора. На рис. 7.3 показана схема переходов между режимами.

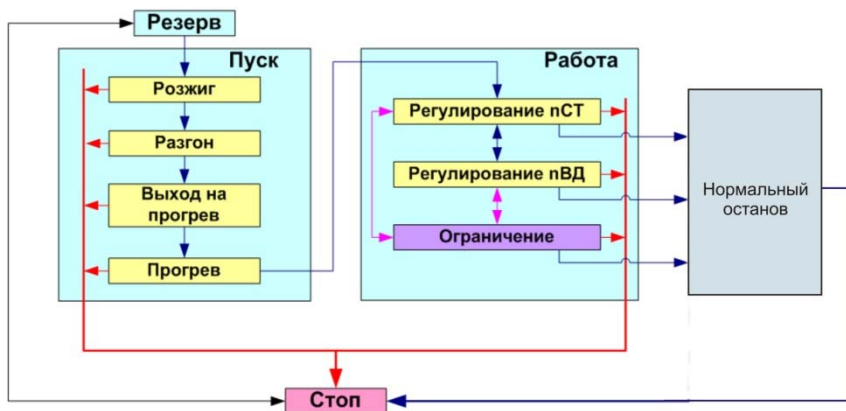


Рис. 7.3. Переходы между режимами топливного регулятора

Режим работы регулятора закодирован в параметре «Состояние регулятора», расшифровка которого приведена в приложении Б.

При работе ГПА в окне «Управление» ПК «Аргус» отображается текущее состояние регулятора и контура, по которому в данный момент осуществляется регулирование. В окне «Сигнализация» отображаются предупредительные сообщения об ограничениях и отказах каналов измерения параметров, участвующих в регулировании.

Все сообщения фиксируются в журнале событий, список сообщений с указанием статуса приведен в приложении В.

В режиме «РЕЗЕРВ» осуществляется ручное (дистанционное) управление топливным клапаном с целью проверки клапана. Этот режим соответствует остановленному двигателю.

В режиме «ПУСК» осуществляется запуск двигателя в соответствии с алгоритмом запуска конкретной модели. Переход в режим «ПУСК» осуществляется по сигналу из логической программы.

Режим пуска ГТД делится на четыре функционально завершённых этапа:

1. Розжиг.

2. Разгон по программе.
3. Разгон по пВД.
4. Прогрев на холостом ходу.

После подачи команды на пуск ГТД регулятор выдает задание на расход топлива, необходимый для обеспечения розжига. Расход топлива определяется настройкой расхода на розжиг (задается в конфигураторе) и значения регулировки расхода на розжиг (задается в ПК «АРГУС»). Для корректировки расхода розжига оператором в ПК «Аргус» доступен настраиваемый параметр «Регулировка расхода на розжиг». Программа автоматически пересчитывает требуемый расход в задание на открытие топливного клапана с коррекцией по давлению и температуре топливного газа. Розжиг камеры сгорания контролируется по перепаду текущей температуры газов за турбиной и значению этой температуры, зафиксированному перед розжигом. По умолчанию розжиг фиксируется при перепаде 50°C (настройка конфигуратора fireShift).

После осуществления розжига осуществляется разгон по разомкнутому контуру. При этом осуществляется разгон с учетом двух закономерностей. Первая определяется настройками GtRateStarterON и GtRateStarterOF, заданными в топливном конфигураторе. Эти настройки определяют темп изменения расхода топлива при разгоне по разомкнутому контуру при включенном и выключенном стартере соответственно. Значение обоих этих настроек по умолчанию – 65 [кг/ч]/с . Кроме того, в этом режиме контролируется величина температуры. Если температура начинает превышать величину настройки, равную разнице ограничения температуры и настройки dTstartMax (ширина зоны торможения на запуске), темп разгона уменьшается, чтобы не допустить излишне высокой температуры.

При достижении пНДпр, заданной в конфигураторе настройкой NndFeedback (соответствует точке переключки РНА), замыкается обратная связь по пВД и дальнейший разгон, прогрев (частота прогрева задается настройкой NvdMG – 5800 об/мин) происходит по рабочему контуру пВД. Темп разгона в этом режиме определяется настройкой rateNvdStart (35 [об/мин]/с).

Прогрев длится в течение 300 с (настройка timeHeat), после чего регулятор переходит в режим «Работа».

В режиме «РАБОТА» осуществляется регулирование частоты вращения турбины газогенератора или силовой турбины по заданию оператора или с помощью кнопок с панели управления с уче-

том ограничений. Переход из режима «ПУСК» в режим «РАБОТА» осуществляется автоматически по окончании выполнения алгоритма пуска.

На этом режиме задание на частоту вращения может изменяться кнопками «РЧВ вверх» и «РЧВ вниз», а также путем задания нового значения настраиваемому параметру «Задание на N СТ», в случае работы контура nCT, и «Задание на N ТВД», если активен контур nBK. Скорость изменения оборотов от текущих до заданных определяется настройками конфигуратора rateNstBtn (20 [об/мин]/с) и rateNvdBtn (20 [об/мин]/с). Переключение между рабочими контурами происходит по команде оператора путем нажатия на кнопку выбора контура регулирования на соответствующей мнемосхеме ПК «Аргус».

В режиме «НОРМАЛЬНЫЙ ОСТАНОВ» осуществляется снижение частоты вращения двигателя для его охлаждения, охлаждение на холостом ходу в течение заданного времени, после чего автоматически происходит переход в режим «СТОП». Последовательность нормального останова может быть модифицирована с учетом специфики модели двигателя.

При входе в этот режим замыкается обратная связь по частоте вращения nВД и производится снижение до частоты, определенной настройкой NvdMG (5800 об/мин) с темпом, определяемым настройкой rateNvdNO (80 [об/мин]/с).

По истечении времени охлаждения на малом газу (определяемого в барабанах программы логического управления) регулятор переходит в режим «Стоп».

Режим «Стоп» инициируется либо при срабатывании любой аварийной защиты, либо при нормальном останове после окончания охлаждения ГТУ. При этом дозатор закрывается независимо от любых других условий.

В режиме «СТОП» происходит полное закрытие дозатора с максимальной скоростью. Переход из режима «СТОП» в режим «РЕЗЕРВ» осуществляется автоматически при отсутствии аварийных сигналов и снижении оборотов ниже заданного значения. Этот режим автоматически активируется после завершения этапа охлаждения двигателя или при наличии аварийных сигналов.

Система настроек топливного регулятора

Для настройки регулятора под конкретный двигатель служит набор аналоговых параметров, часть из которых доступна для изме-

нения с рабочей станции оператора на работающем двигателе, а остальные задаются с помощью программы-конфигуратора регулятора. Конфигуратор создает файлы, которые затем интегрируются в проект и не изменяются в процессе работы двигателя.

Основное отличие между настройками, задающимися в конфигураторе, и параметрами, изменяемыми оператором, состоит в том, что первые соответствуют определенному типу двигателя, а вторые позволяют произвести более тонкую настройку регулятора под конкретную установку.

При этом перечень настроек, описываемый в конфигураторе, сильно зависит от типа двигателя и может отличаться для различных моделей, в то время как настройки, доступные оператору, обычно имеют одинаковый смысл для любого двигателя.

Конфигуратор

Для задания значений настроек, которые определяют работу регулятора для конкретного типа двигателя, служит конфигуратор, который представляет собой файл формата Microsoft Excel и содержит в себе несколько листов с настройками.

Наряду с настройками непосредственно программы топливного регулирования конфигуратор может содержать листы, на которых описываются параметры, необходимые для имитационного моделирования двигателя. Они используются при наличии программы имитации и не влияют на работу регулятора.

Конфигуратор поддерживает два типа настроек – числовые и табличные. Числовые настройки – это константы с определенным именем. Табличные настройки задают наборы интервалов для кусочно-линейной аппроксимации необходимых для управления зависимостей. Перечень параметров работы ГПА приведен в приложении Г.

Настройки, доступные из пультовой программы

Обычно доступными для изменения оператором настройками являются коэффициенты ПИД-регуляторов (см. главу 5 настоящего учебника). Это позволяет осуществить так называемую «тонкую» настройку системы топливного регулирования под конкретный двигатель – в процессе его функционирования – без необходимости перезагрузки контроллера. Доступ к изменению этих коэффициентов должен быть тем или иным способом ограничен с тем, чтобы проводить изменения мог только высококвалифицированный персонал.

7.3 Методика определения коэффициентов регуляторов

В данном разделе описываются теоретические основы, опирающиеся на элементы теории автоматического управления.

Теоретические основы

Задачей регулятора является:

- обеспечение перехода объекта управления в заданную рабочую точку без установившейся ошибки;
- обеспечение переходных процессов надлежащего качества (отсутствие перерегулирования и колебательности, минимальное время регулирования).

В составе САУ ГПА используется контур управления частотой вращения КВД и следующие ограничительные контуры:

- частоты вращения свободной турбины (СТ);
- частоты вращения КНД,
- температуры газа перед СТ,
- давления за осевым компрессором (ОК).

Часть этих контуров выполняет одновременно функции стабилизации и ограничения управляемой величины, другие выполняют только одну функцию. На уровне программной реализации стабилизирующие и ограничительные контуры, которые управляют одной и той же величиной, отличаются только заданием на эту величину. Коэффициенты ПИД-регулятора для таких контуров устанавливаются одинаковыми. С точки зрения управления в используемой селекторной схеме задача ограничения и задача стабилизации ничем не отличаются, поэтому методика расчета коэффициентов для ограничительных и стабилизирующих контуров также одинакова.

В программе топливного регулирования используется ПИД-регулятор с зоной нечувствительности, ограничением выходного значения и следующей передаточной функцией:

$$W_{\text{ПИД}}(S) = K_{\text{ОБЩ}} \left(1 + \frac{1}{T_{\text{И}} S} + \frac{K_{\text{Д}} S}{T_{\text{Д}} S + 1} \right).$$

Здесь постоянные времени $T_{\text{И}}$ и $T_{\text{Д}}$ предназначены для компенсации постоянных времени объекта управления, коэффициент усиления $K_{\text{ОБЩ}}$ отвечает за величину изменения режима работы двигателя.

Все настройки ПИД-регуляторов доступны для изменения в режиме реального времени с рабочей станции оператора.

Коррекция настроек регуляторов на объекте

Значения настроек, полученные при разработке САУ по исходным данным о двигателе, могут при необходимости быть скорректированы для точного соответствия характеристикам конкретного объекта. Настройка коэффициента усиления K может быть выполнена одинаковым образом для всех контуров регулирования при условии правильности значений постоянных времени $T_{и}$ и $T_{д}$.

После настройки коэффициента усиления следует несколько увеличить зону нечувствительности, если есть необходимость улучшения качества стабилизации на установившемся режиме.

Настройка контура частоты вращения КВД

Зависимость частоты вращения КВД от положения топливного клапана (фактически, от расхода топлива) в первом приближении может быть описана апериодическим звеном первого порядка с передаточной функцией

$$W_{n\text{КВД}}(S) = \frac{K}{T_{д}S + 1}.$$

Следовательно, для управления таким объектом достаточно использовать ПИ-регулятор с соответствующей передаточной функцией. Настройка регулятора частоты вращения КВД сводится к компенсации постоянной времени $T_{n\text{КВД}}$ и выбору необходимого коэффициента усиления. Рис.7.4 иллюстрирует переходные процессы по оборотам КВД при различной настройке регулятора.

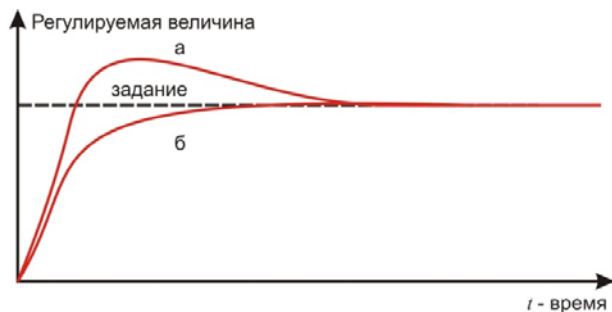


Рис. 7.4. Переходные процессы по $N_{\text{КВД}}$:

а – при неправильной настройке регулятора; б – при точной настройке

При заниженном по сравнению с реальной постоянной времени объекта значении T_1 переходный процесс будет идти с перерегулированием (рис. 7.4,а). В этом случае нужно увеличивать T_1 без изменения остальных настроек. При завышенном значении T_1 имеет вид, показанный на рис. 7.4,б – медленное начало процесса и медленное приближение к установившемуся значению. При таком виде переходного процесса нужно уменьшать T_1 .

Настройка контура частоты вращения СТ

Силовая турбина достаточно адекватно описывается аperiodическим звеном второго порядка, поэтому для управления ее частотой вращения используется ПИД-закон. Передаточная функция частоты вращения СТ по положению дозатора топлива выглядит следующим образом:

$$W_{nCT} = \frac{K_{nCT}}{(T_{1nCT}S + 1)(T_{2nCT}S + 1)}$$

Все настройки регулятора (K , T_1 , T_2) должны иметь ненулевые значения. Настройка регулятора n_{CT} должна выполняться после настройки регулятора $n_{КВД}$. Величина настройки T_1 регулятора n_{CT} должна совпадать с величиной постоянной времени регулятора $n_{КВД}$, поскольку одна постоянная времени передаточной функции W_{nCT} совпадает с постоянной времени передаточной $W_{nКВД}$.

Таким образом, настройку контура частоты вращения СТ необходимо осуществлять после выбора коэффициентов для регулятора скорости КВД, при этом осуществлять изменение только параметров K и T .

На рис. 7.5 показан вид переходных процессов при неправильной настройке постоянной времени T регулятора.

При низком значении T_2 появляется колебательность (рис. 7.5,а), которая может привести к отсутствию установившегося режима. В этом случае коэффициент T_2 следует увеличивать. При повышенном значении T_2 переходный процесс также приобретает колебательность (рис. 7.5, б), однако при этом характерно быстрое начало процесса и медленное приближение к установившемуся значению. При таком виде переходного процесса необходимо уменьшать коэффициент T_2 .

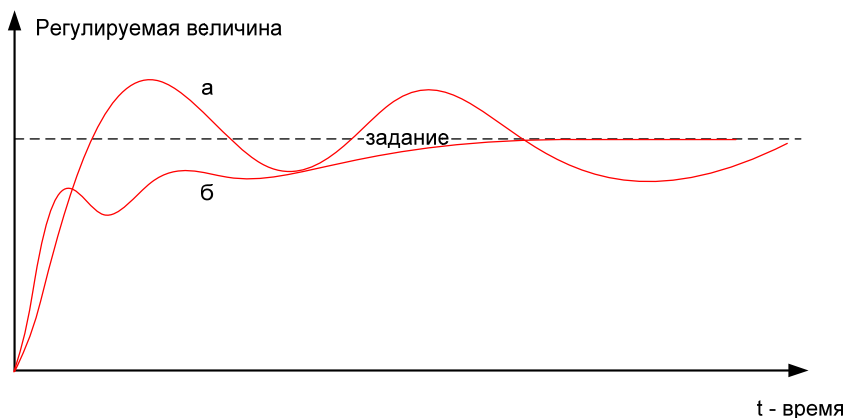


Рис. 7.5. Переходные процессы по $N_{СТ}$ при неправильной настройке регулятора

При изменении коэффициентов регулятора возможна потеря устойчивости, поэтому настройку всегда нужно начинать с предельно малого значения коэффициента усиления. В случае появления признаков потери устойчивости («раскачки») нужно установить коэффициент усиления K равным 0, после чего откорректировать T_2 и восстановить значение коэффициента усиления.

Настройка контура частоты вращения КНД

Для управления частотой вращения КНД используется ПИ-регулятор, при этом коэффициент T_1 необходимо принять равным аналогичному коэффициенту контура частоты вращения КВД, а коэффициент усиления определяется по той же методике, что и для остальных контуров.

Настройка контура температуры газов перед СТ

Для регулирования температуры газов перед СТ используется ПИ-регулятор. Постоянная времени T_1 должна быть равна постоянной времени программного фильтра температуры газов перед СТ. Коэффициент усиления можно считать подходящим, если при переходе на контур нет больших колебаний расхода топлива (задания на топливный клапан). Некоторые колебания расхода топлива допустимы, они являются следствием необходимости высокого усиления в контуре из-за его ограничительной функции.

Настройка контура давления за ОК

Контур используется для ограничения давления за ОК. Регулирование осуществляется по ПИ-закону. Коэффициент T_1 принимается равным аналогичному коэффициенту контура частоты вращения КВД, а коэффициент усиления определяется по той же методике, что и для остальных контуров.

7.4 Взаимодействие с логической программой

Для взаимодействия с логической программой служит набор дискретных (логических) входов и выходов топливного регулятора. Число и назначение сигналов зависит от конкретной модели двигателя, однако принцип взаимодействия является общим для всех систем. Топливный регулятор работает только по переходу входных дискретных сигналов из состояния FALSE (неправильное) в состояние TRUE (верное). Состояние сигнала после осуществления перехода не имеет значения.

Для управления регулятором служат следующие входные логические сигналы:

1. Fl_start – обобщенный пуск двигателя.
После получения этого сигнала топливный регулятор начинает программу запуска двигателя открытием дозатора на розжиг. При этом формируется режим «ПУСК». Запуск заканчивается автоматически выводом двигателя на минимальный режим (малый газ) и формированием режима «РАБОТА».
2. Fl_stop – нормальный останов двигателя.
При получении этого сигнала осуществляется нормальный останов двигателя по соответствующей программе. При этом формируется режим «НОРМАЛЬНЫЙ ОСТАНОВ». После окончания останова дозатор закрывается, а топливный регулятор автоматически переходит в режим «РЕЗЕРВ».
3. Fl_regulST, Fl_regulVD (Fl_regulND) – регулирование частоты вращения СТ, КВД (КНД) на режиме.
Эти сигналы служат для переключения между контурами регулирования частот вращения в режиме «РАБОТА».

4. Fl_turnUP, Fl_turnDN – увеличение/уменьшение задания на частоту вращения на режиме.

Эти сигналы служат для поднятия или снижения задания на частоту вращения по кнопкам «РЧВ вверх», «РЧВ вниз» с панели управления оператора или с рабочей станции оператора в режиме «РАБОТА».

5. FAI_fromLogic – обобщенная авария из логики.

Этот сигнал служит для аварийного закрытия дозатора топлива при возникновении аварийной ситуации. После его получения регулятор переходит в режим «СТОП». Переключение в режим «РЕЗЕРВ» происходит с помощью сигнала деблокировки аварии при отсутствии аварийных сигналов.

6. Fl_deblock – деблокировка аварии.

Для получения информации о состоянии регулятора служат выходные дискретные сигналы:

1. isFire – наличие факела.

Сигнал формируется при фиксировании горения в камере сгорания.

2. RRp_loLimited, RRp_hiLimited – двигатель на нижнем/верхнем ограничении.

Сигналы формируются при выходе двигателя на минимальный/максимальный режимы по какому-либо технологическому ограничению.

3. RRp_regulST, RRp_regulVD (RRp_regulND) – управление частотой вращения СТ, КВД (КНД).

Эти выходы сигнализируют о том, частотой вращения какой турбины в данный момент времени управляет топливный регулятор.

4. RRp_hiLimitXXX, RRp_loLimitXXX – сигнализация об ограничениях.

Эти выходы сигнализируют о том, что двигатель находится близко к ограничению по параметру XXX. Перечень сигналов может отличаться для разных моделей двигателя.

5. RRp_feedback – работа по обратной связи.

6. RRp_reserve, RRp_start, RRp_work, RRp_NO, RRp_stopD – режим работы регулятора.

7. Pr_XXX – предупредительная сигнализация (индивидуальный список для каждой модели двигателя).

8. FAr_fromRegul – обобщенная авария.

Сигнал формируется при аварийном останове двигателя.

9. FAg_XXX – аварийная сигнализация (индивидуальный список для каждой модели двигателя).

Сигнализация информирует о причинах, вызвавших аварийный останов двигателя.

При необходимости список сигналов может быть откорректирован.

Перечень контуров топливного регулятора

Для управления двигателем может быть использована следующая система регулирующих и ограничительных контуров:

1. Регулирующий контур по частоте вращения КВД.
2. Регулирующий контур по частоте вращения СТ.
3. Верхний ограничительный контур по частоте вращения КНД.
4. Верхний ограничительный контур по частоте вращения КВД.
5. Нижний ограничительный контур по частоте вращения КВД.
6. Верхний ограничительный контур по частоте вращения СТ.
7. Нижний ограничительный контур по частоте вращения СТ.
8. Верхний ограничительный контур по температуре перед СТ.
9. Верхний ограничительный контур по давлению за ОК.

Подрезимы двигателя

Работа топливного регулятора условно разделена на несколько режимов: «РЕЗЕРВ», «ПУСК», «РАБОТА», «НОРМАЛЬНЫЙ ОСТАНОВ», «СТОП». Каждый из вышеперечисленных режимов разбит на подрезимы, обусловленные технологией работы двигателя. Однако на практике такие режимы как «РЕЗЕРВ», «РАБОТА» и «СТОП» являются функционально завершенными и не требуют декомпозиции.

Для двигателя Д-336-А можно сформировать следующую структуру:

Режим «РЕЗЕРВ»

В этом режиме осуществляется ручное (дистанционное) управление положением топливного клапана с целью его проверки. Переход в режим «ПУСК» осуществляется по флагу Fl_start из логической программы.

Режим «ПУСК»

«Розжиг»

В этом подрежиме осуществляется открытие дозатора для розжига. Подрежим активируется автоматически при включении режима «ПУСК». При этом величина открытия рассчитывается следующим образом. Сначала вычисляется расход топливного газа по формуле:

$$G_{\text{fix}} = G_0 + 0.0067 \cdot (50 - T_{\text{атм}}) \cdot P_{\text{атм}},$$

где G_{fix} – расход, который необходимо обеспечить для розжига;

G_0 – расход для розжига при НУ (задается в конфигураторе), кг/ч;

$T_{\text{атм}}$ – температура атмосферного воздуха, °С;

$P_{\text{атм}}$ – давление атмосферного воздуха, кПа.

Затем высчитывается поправочный коэффициент для приведения расхода к текущему давлению топливного газа (в дальнейшем он же используется при пусковом открытии по программе):

$$K = P_{\text{тг}} / P_{\text{тг0}},$$

где $P_{\text{тг}}$ – измеренное давление топливного газа, МПа;

$P_{\text{тг0}}$ – давление, для которого была построена характеристика топливного клапана, МПа.

После этого по формуле $G'_{\text{fix}} = G_{\text{fix}} / K$ рассчитывается необходимый для розжига расход, а затем по характеристике топливного клапана определяется нужная степень открытия (характеристика преобразования описывается в конфигураторе).

Переход в следующий подрежим осуществляется автоматически при достижении частоты вращения КВД большей, чем значение настройки VD_LINE (4200 об/мин), либо через 4 секунды после начала розжига.

«Пусковое открытие по программе»

В этом подрежиме осуществляется открытие дозатора для разгона двигателя по линейной зависимости от времени:

$$G = G_{\text{fix}} + (0.1 + 0.00055 \cdot (50 - T_{\text{атм}})) \cdot P_{\text{атм}} \cdot t,$$

где G_{fix} – расход газа, подсчитанный на предыдущем подрежиме, МПа;

t – время с момента перехода в текущий подрежим, с.

Далее величина G_{fix} пересчитывается в степень открытия топливного клапана тем же способом, что и в предыдущем подрежиме. Переход на следующий подрежим (замыкание обратной связи по частоте вращения КВД) осуществляется, когда частота вращения КВД достигает значения настройки VD_FEEDBACK (7100 об/мин) и расход становится больше настройки GT_FEEDBACK (550 кг/ч).

«Разгон по частоте вращения КВД»

В этом подрежиме замыкается обратная связь по частоте вращения КВД, после чего осуществляется разгон до малого газа. Приведенная частота вращения малого газа (11200 об/мин) задается в конфигураторе настройкой VD_MG. При этом скорость увеличения частоты вращения ограничивается настройкой RATE_VD_START (80 [об/мин]/с). Переход на «Прогрев» осуществляется автоматически при достижении оборотов малого газа.

«Прогрев»

На этом подрежиме осуществляется прогрев двигателя на частоте вращения малого газа в течение промежутка времени, задаваемого настройкой TIME_PROGREV (330 с). Переход на следующий подрежим происходит автоматически по истечении этого времени.

«Разгон по частоте вращения СТ»

При переходе на этот подрежим замыкается обратная связь по частоте вращения СТ, после чего двигатель разгоняется до частоты, задаваемой настройкой ST_MG (5740 об/мин). Скорость увеличения частоты вращения ограничивается настройкой RATE_ST_START (50 [об/мин]/с). Переход в режим «РАБОТА» осуществляется также автоматически после набора частоты вращения, равной ST_MG.

Режим «РАБОТА»

В этом режиме осуществляется регулирование по частоте вращения КВД или СТ (в зависимости от выбора оператора) с учетом ограничений по частотам вращения, температуре газов перед СТ и давления за осевым компрессором газогенератора. При функционировании в режиме «РАБОТА» скорость изменения частоты вращения ограничивается значением настройки RATE_ST (20 [об/мин]/с) для СТ и RATE_VD (20 [об/мин]/с) для КВД.

Переход в режим «НОРМАЛЬНЫЙ ОСТАНОВ» осуществляется по флагу Fl_stop из логической программы. Переход в режим «СТОП» осуществляется автоматически при наличии аварийных сигналов.

Режим «НОРМАЛЬНЫЙ ОСТАНОВ»

«Выход на ХХ»

При переходе в подрежим происходит снижение частоты вращения КВД до нижней границы регулирования по приведенной частоте вращения, задаваемой настройкой LOLIMIT_VD (11200 об/мин). Скорость снижения оборотов ограничивается настройкой RATE_VD_NO (50 [об/мин]/с). Переход в следующий подрежим осуществляется автоматически при достижении нижней границы регулирования по частоте вращения КВД.

«Охлаждение двигателя»

В этом подрежиме происходит охлаждение двигателя на нижней границе регулирования по частоте вращения КВД в течение промежутка времени, задаваемого настройкой TIME_OHLD (330 с). Переход в режим «СТОП» осуществляется автоматически после истечения заданного времени.

Режим «СТОП»

В этом режиме осуществляется закрытие дозатора с максимальной скоростью. Переход в режим «РЕЗЕРВ» происходит автоматически при снижении оборотов КВД ниже значения настройки VD_STOP (300 об/мин) и отсутствии аварийных сигналов. Если был произведен аварийный останов, то после пропадания условий возникновения АО необходимо осуществить деблокировку аварий.

Переходы между подрежимами осуществляются топливным регулятором в соответствии с технологией управления двигателем.

Сигнализация ограничений

- RRp_hiLimitND – верхнее ограничение по частоте вращения КНД;
- RRp_hiLimitVD – верхнее ограничение по частоте вращения КВД;
- RRp_loLimitVD – нижнее ограничение по частоте вращения КВД;
- RRp_hiLimitST – верхнее ограничение по частоте вращения СТ;
- RRp_loLimitST – нижнее ограничение по частоте вращения СТ;

- RRp_hiLimitT – верхнее ограничение по температуре газов перед СТ;
- RRp_hiLimitP – верхнее ограничение по давлению за компрессором.

Предупреждения

- Pr_STdoubt – рассогласование показаний по каналам измерения частоты вращения СТ;
- Pr_VDdoubt – рассогласование показаний по каналам измерения частоты вращения КВД;
- Pr_TbfSTdoubt – рассогласование по каналам измерения температуры газов перед СТ;
- Pr_TbfSTXbrk – неисправна термопара X;
- Pr_distortDUS – высокое рассогласование задания и положения ТК;
- Pr_distortTmax – высокий выброс температуры вверх;
- Pr_distortTmin – высокий выброс температуры вниз.

Аварии

- FAr_fromLogic – авария по сигналу из логической программы;
- FAr_SThigh – аварийно высокие обороты СТ;
- FAr_VDhigh – аварийно высокие обороты КВД;
- FAr_NDhigh – аварийно высокие обороты КНД;
- FAr_TbfSThigh – аварийно высокая температура газа перед СТ;
- FAr_STfault – обрыв каналов измерения частоты вращения СТ;
- FAr_VDfault – обрыв каналов измерения частоты вращения КВД;
- FAr_NDfault – обрыв каналов измерения частоты вращения КНД;
- FAr_termopFault – обрыв каналов измерения температуры перед СТ;
- FAr_distortDUS – аварийное рассогласование задания и положения ТК.

8 СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ НАГНЕТАТЕЛЕМ ГАЗА [16]

В процессе работы ГПА специальных действий персонала КЦ по управлению нагнетателем не требуется. Для нормального функционирования нагнетателя достаточно обеспечить заданную частоту вращения ротора нагнетателя и давления на его входе и выходе. Эти параметры поддерживаются автоматическими системами управления газотурбинным приводом и компрессорной станции.

Однако отклонение этих параметров от номинальных (расчетных) значений нарушит обтекание потоком газа рабочих лопастей ротора и лопаток статора. Появляющиеся при этом срывы потока вызывают помпаж.

Помпаж – это неустойчивый режим работы нагнетателя, сопровождаемый возникновением низкочастотных колебаний давления, температуры и расхода газа. Помпаж, как правило, сопровождается вибрацией и акустическими ударами, при этом многократно возрастают динамические нагрузки на узлы и детали нагнетателя, что ведет их к разрушению, если немедленно не вывести нагнетатель из этого состояния.

С этой целью в составе оборудования ГПА предусматривается специальный антипомпажный регулятор, управляющий перепуском части транспортируемого газа с выхода на вход нагнетателя по малому «кольцу» обвязки нагнетателя.

8.1 Теоретические основы и алгоритм работы антипомпажного регулятора

Центробежный нагнетатель имеет зависимость степени сжатия от расхода (газодинамическую характеристику) при различной частоте вращения ротора, показанную на рис. 8.1. Зона, находящаяся левее линии *ab*, является зоной неустойчивой работы (срыва потока с лопаток нагнетателя) – работа в этой области недопустима. Граница зоны неустойчивой работы (линия *ab*) называется границей пом-

пажа (помпаж – низкочастотные колебания расхода и давления, возникающие при вхождении нагнетателя в зону неустойчивой работы). При эксплуатации нагнетателя не следует допускать работы левее линии cd (граница регулирования).

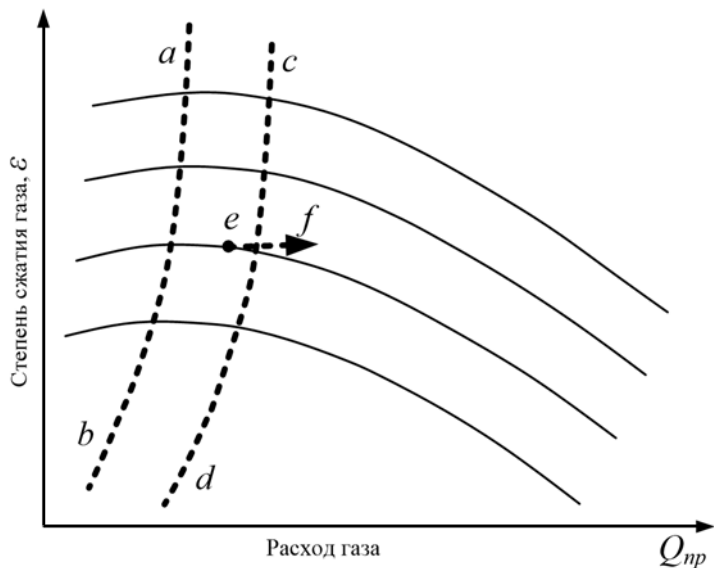


Рис. 8.1. Газодинамическая характеристика центробежного нагнетателя

Обычно режим работы компрессорной станции выбирается таким образом, чтобы нагнетатели работали в устойчивом режиме. Тем не менее, различные возмущающие воздействия могут приводить к тому, что режим работы нагнетателя приближается к неустойчивому. Для того, чтобы избежать помпажных колебаний, осуществляется частичный перепуск (байпасирование) газа с выхода на вход нагнетателя при помощи байпасного клапана с аналоговым управлением. При этом расход газа через нагнетатель увеличивается (линия ef) и нагнетатель сохраняет устойчивый режим работы.

Принцип работы антипомпажного регулятора состоит в оценке расстояния до границы помпажа и выработке задания на степень открытия байпасного клапана. Расстояние до границы помпажа называется помпажным запасом, оно вычисляется следующим образом.

Настройками системы антипомпажного регулирования являются коэффициенты полиномов второго порядка, аппроксимирую-

щих границу помпажа в различных координатах (расход – частота вращения СТ, расход – степень сжатия, степень сжатия – частота вращения). Основной системой координат является система «расход – частота вращения СТ». Для оценки расстояния до границы помпажа вычисляется помпажный расход

$$Q_n = coeff_2 \cdot n_{CT}^2 + coeff_1 \cdot n_{CT} + coeff_0,$$

то есть минимальный расход, который может обеспечить нагнетатель при данной частоте вращения. Помпажный запас вычисляется как

$$z = 100 \cdot \frac{Q - Q_n}{Q_n},$$

где Q – текущий расход через нагнетатель.

Наличие трех систем координат позволяет дублировать информацию, что обеспечивает работу системы при отказе части датчиков. Геометрический смысл величин помпажного запаса, вычисленных в трех системах координат, показан на рис. 8.2. По первой системе координат помпажный запас Z_1 определяется как разность расходов газа по кривой $n_{CT} = \text{const}$ от точки A до линии $c-d$.

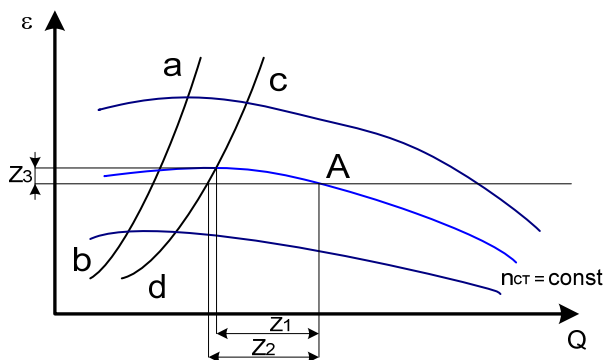


Рис. 8.2. Различные способы вычисления помпажного запаса

По второй системе координат помпажный запас Z_2 определяется по прямой $\varepsilon = \text{const}$ от точки A до линии $c-d$.

По третьей системе контролируется отношение степени сжатия на границе помпажа $c-d$ при фактической частоте вращения свободной турбины n_{CT} в точке А. Для нормирования величин помпажного запаса применяются коэффициенты приведения.

Помпажный запас:

по основной системе координат

$$Z_1 = 100 \cdot \frac{Q - Q_n}{Q_n}; \quad Q_n = k_{21} \cdot n_{CT_отн}^2 + k_{11} \cdot n_{CT_отн} + k_{01};$$

$$n_{CT_отн} = \frac{n_{CT}}{n_{CT_номин}};$$

по первой резервной системе координат

$$Z_2 = 100 \cdot K_{2_1} \cdot \frac{Q - Q_n}{Q_n}; \quad Q_n = k_{22} \cdot \varepsilon^2 + k_{12} \cdot \varepsilon + k_{02};$$

по второй резервной системе координат

$$Z_3 = 100 \cdot K_{3_1} \cdot \frac{\varepsilon - \varepsilon_n}{\varepsilon_n}; \quad \varepsilon_n = k_{23} \cdot n_{CT_отн} + k_{13} \cdot n_{CT_отн} + k_{03};$$

$$n_{CT_отн} = \frac{n_{CT}}{n_{CT_номин}}.$$

Коэффициенты приведения K_{2_1} и K_{3_1} непрерывно вычисляются при исправности всех датчиков. При отказе одного из датчиков, обеспечивающих работу основной системы координат (частота вращения и перепад давлений на конфузоре нагнетателя), производится переход на одну из резервных систем координат, коэффициенты приведения для Z_1 при этом перестают вычисляться. Помпажный запас начинает вычисляться по формуле для соответствующей резервной системы координат.

Антипомпажный регулятор состоит из трех крупных функциональных блоков:

1. Вычислитель помпажного запаса.
2. Сигнализатор помпажа.
3. Блок управления байпасным краном.

Вычислитель помпажного запаса выполняет расчет помпажного запаса, а также расчет приведенной частоты вращения и степени сжатия. Его настройками являются коэффициенты полиномов, аппроксимирующих границу помпажа в трех системах координат.

Сигнализатор помпажа предназначен для диагностирования срыва потока в нагнетателе по физическим признакам – без наличия информации о границе помпажа. Этот блок выполняет резервирование защитных функций, он же используется для экспериментального определения границы помпажа нагнетателя. Сигнализатор помпажа анализирует производные по времени от перепада давлений на конфузоре нагнетателя, частоты вращения ротора нагнетателя и помпажного запаса по расходу. Диагностирование факта срыва потока основано на том, что рабочие значения этих производных в 2-10 раз ниже по модулю, чем производные при срыве потока. Таким образом, можно задать предельное значение, ниже которого при нормальной работе не должны опускаться производные от перепада давлений на конфузоре и от помпажного запаса, и порог, выше которого не может подниматься производная от частоты вращения ротора нагнетателя. Срывное (предпомпажное) состояние фиксируется при одновременном превышении пороговых значений производными от перепада давлений на конфузоре нагнетателя и частоты вращения.

Блок управления байпасным краном объединяет информацию, получаемую от двух других блоков, а также получает дискретные сигналы – команды от программы логико-командного управления. По этим сигналам вырабатывается управляющее воздействие на байпасный кран, причем алгоритм выработки этого воздействия изменяется в зависимости от команд. Алгоритмы работы в зависимости от внешних команд иллюстрируются нижеприведенной табл. 8.1.

В данной таблице приняты следующие обозначения: х – состояние сигнала безразлично, 1 и 0 обозначают для верхней части таблицы состояние сигнала, а для нижней части соответственно выполнение или невыполнение какого-либо фрагмента алгоритма. Таким образом, например, при одновременном наличии сигналов «Работа» и «Закрыть» выполняются вычисления ошибок регулирования по помпажному запасу, давлению и степени сжатия, выбор рабочего контура управления и ограничение скорости закрытия. Для строк «Время открытия» и «Время закрытия» в таблице приведены числовые значения (в секундах).

Таблица 8.1. Алгоритмы работы защиты нагнетателя

Параметр	Состояние							
	1	x	x	0	0	0	0	0
Экстренно открыть	1	x	x	0	0	0	0	0
Открыть	x	1	1	0	0	0	0	0
Работа	x	0	1	0	0	1	1	1
ДУ	x	x	x	0	1	0	1	0
Закрыть	x	x	x	1	0	1	0	0
Начать помпажный тест	x	x	x	0	0	0	0	1
Вычисление $\Delta ПЗ = ПЗ - Set ПЗ$	0	0	0	0	0	1	0	0
Вычисление (ПИД) $\Delta У_{ПЗ}$ (контур ПЗ (1))	0	0	0	0	0	1	0	0
Вычисление $\Delta P = P_{max} - P_{вых}$	0	0	0	0	0	1	1	1
Вычисление (ПИД) $\Delta У_P$ (контур $P_{вых}$ (2))	0	0	0	0	0	1	1	1
Вычисление $\Delta E = E_{max} - E$	0	0	0	0	0	1	1	1
Вычисление (ПИД) $\Delta У_E$ (контур E (3))	0	0	0	0	0	1	1	1
Выбор контура управления (минимум)	0	0	0	0	0	1	1	1
Пересылка на выход управляющего воздействия от оператора	0	0	0	0	1	0	0	0
Формирование задания 100% (закрытие)	0	0	0	1	0	0	0	1
Формирование задания 0% (открытие)	1	1	1	0	0	0	0	0
Ограничение скорости закрытия и открытия Вычисление $У_{бр\ выч} = У_{бр\ тек} + \Delta У_{бр\ выч}$ Ограничение 0...100% (блок – ограничитель ¹)	1	1	1	1	1	1	1	1
Время открытия ²	0	0	10	x	0	10	10	x
Время закрытия	x	x	x	0	0	60	60	100

¹ Параметры ограничителя скорости – разные в зависимости от режима работы (см. «Время открытия» и «Время закрытия»).

² Если задано нулевое время открытия или закрытия, то оно принимает значение, равное времени цикла

На рис. 8.3 показана структурная схема контуров обратной связи, реализуемых в АПР. Собственно контуры обратной связи являются частью блока управления байпасным краном, блок вычисления помпажного запаса реализован отдельно, блок антипомпажной защиты на этом рисунке не показан.

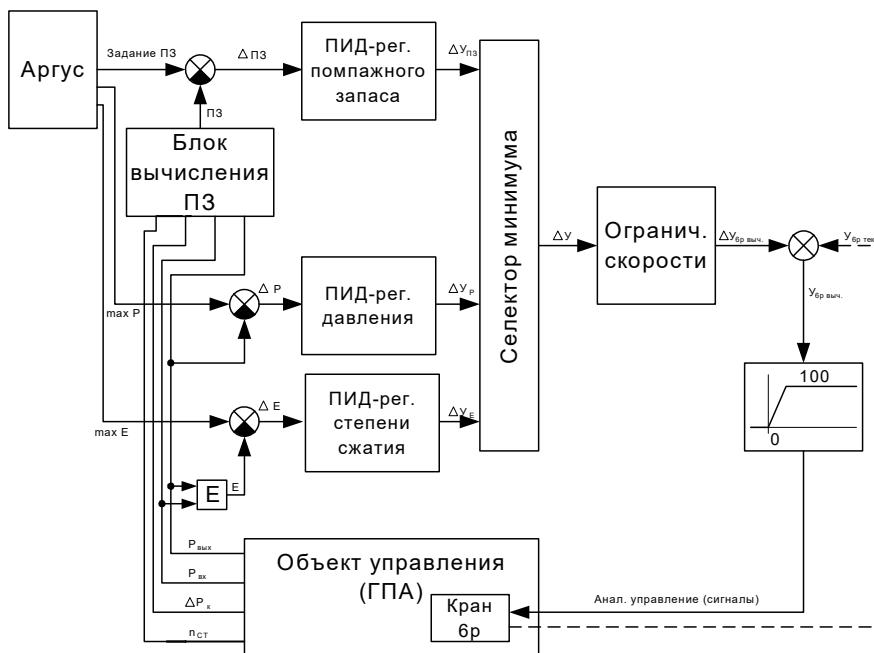
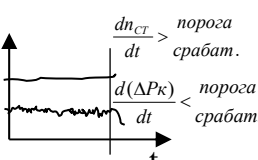


Рис. 8.3. Структурная схема контуров обратной связи антипомпажного регулятора

Антипомпажный регулятор (АПР) состоит из представленных в табл. 8.2 функциональных блоков.

Таблица 8.2. Структура программного обеспечения АПР

Вычислитель помпажного запаса	Сигнализатор помпажа	Блок управления байпасным краном
<p>Вычисление Q, E по P_{вх}, P_{вых}, ΔP_к, P_{атм}, T_{вх}, ρ_{норм}, K</p> $Q = K * \sqrt{\frac{\Delta P_k}{\rho}}$ <p>ρ = P_{вх} * ρ_{норм}</p> $E = \frac{P_{вых} + P_{атм}}{P_{вх} + P_{атм}}$ <p>Вычисление Q_{помп} Q_п = an2ct + bnct + c</p> <p>Вычисление помпажного запаса</p> $Z = \frac{Q - Q_n}{Q_n} * 100\%$ <p>Приведение резервных систем координат к основной Передача ПХ для отрисовки в «Аргусе»</p>	<p>Анализ $\frac{d(\Delta P_k)}{dt}$</p> <p>Анализ $\frac{dn_{CT}}{dt}$</p>  <p>Выдача дискретного сигнала помпажного состояния нагнетателя при одновременном появлении двух признаков</p>	<p>Управление байпасным краном в соответствии с командами на открытие и закрытие</p> <p>Ограничение минимального помпажного запаса, максимального давления и максимальной степени сжатия при помощи контуров обратной связи</p>
Function Block		
FB TSurgeResCalc	FB TSurgeAlert	FB APR

Входные и выходные сигналы регулятора

Сокращения, принятые в именах сигналов:

PR – Pressure Ratio, степень сжатия;

AS – AntiSurge, антипомпажный;

DZ – Dead Zone, зона нечувствительности;

SR – Surge Reserve, помпажный запас;

P_{in} – входное давление;
 P_{out} – выходное давление;
 Fl – флаг, формируемый в программе логико-командного управления;
 Fr – флаг, формируемый в программе регулирования.

Аналоговые сигналы АПР

Входные сигналы

Сигналы от датчиков – диапазоны измерения соответствуют диапазонам значений соответствующих величин и используемым датчикам (табл. 8.3).

Таблица 8.3. **Входные сигналы и их обозначения**

Входные сигналы	Обозначение
Давление на входе нагнетателя	PinCompr
Давление на выходе нагнетателя	PoutCompr
Перепад давлений на конфузоре нагнетателя	dPconf
Частота вращения ротора нагнетателя	N_ST
Температура газа на входе нагнетателя	TinCompr
Давление атмосферного воздуха	Patm
Положение байпасного клапана ¹	BypassValue

Настройки – являются расчетными, настраиваемыми из пультовой программы параметрами (табл. 8.4).

Таблица 8.4 **Расчетные параметры и диапазоны их изменения**

Параметр	Размерность	Диапазон
Коэффициент при 2-й степени осн. контура	c2main	-20...20
Коэффициент при 1-й степени осн. контура	c1main	-20...20
Коэффициент при 0-й степени осн. контура	c0main	-20...20

¹ Используется только в том случае, если байпас оборудован датчиком положения.

Продолжение табл. 8.4

Параметр	Размерность	Диапазон
Коэффициент при 2-й степени 1-го рез. контура	c2res1	-20...20
Коэффициент при 1-й степени 1-го рез. контура	c1res1	-20...20
Коэффициент при 0-й степени 1-го рез. контура	c0res1	-20...20
Коэффициент при 2-й степени 2-го рез. контура	c2res2	-20...20
Коэффициент при 1-й степени 2-го рез. контура	c1res2	-20...20
Коэффициент при 0-й степени 2-го рез. контура	c0res2	-20...20
Пропорциональный коэфф. антипомпажного ПИД-регулятора	KMulASreg	0...10
Интегральный коэфф. антипомпажного ПИД-регулятора	kIntegASreg	0...10
Дифференциальный коэфф. антипомпажного ПИД-регулятора	kDiffASreg	0...10
Зона нечувствительности антипомпажного ПИД-регулятора	DZASreg	0...10
Пропорциональный коэфф. ПИД-регулятора макс. давления	kMulPoutReg	0...10
Интегральный коэфф. ПИД-регулятора макс. давления	kIntegPoutReg	0...10
Дифференциальный коэфф. ПИД-регулятора макс. давления	kDiffPoutReg	0...10
Зона нечувствительности ПИД-регулятора макс. давления	DZPoutReg	0...10
Пропорциональный коэфф. ПИД-регулятора макс. степ. сжатия	kMulPRreg	0...10
Интегральный коэфф. ПИД-регулятора макс. степ. сжатия	kIntegPRreg	0...10
Дифференциальный коэфф. ПИД-регулятора макс. степ. сжатия	kDiffPRreg	0...10
Зона нечувствительности ПИД-регулятора макс. степ. сжатия	DZPRreg	0...10

Параметр	Размерность	Диапазон
Минимальный помпажный запас (положение линии регулирования), %	minSurgeRes	0..40
Максимальное давление на выходе нагнетателя	maxPout	0...10
Максимальная степень сжатия нагнетателя	maxPR	1...3
Коэффициент конфузора	confCoeff	0...200
Номинальная частота вращения ротора нагнетателя, об/мин	nNorm	0...10000
Плотность газа при нормальных условиях, кг/м ³	roNorm	0...1
Максимальная скорость роста частоты вращения, (об/мин)/с	maxRateNst	0...1000
Максимальная скорость падения перепада на конфузоре, кПа/с	maxRateDPconf	0...100
Задание на положение байпаса при ручном управлении	manBypassSetting	0...100

Выходные сигналы

Таблица 8.5. Сигналы, передаваемые для отображения в пультовой программе

Параметр	Размерность	Диапазон
Степень сжатия	pressRatio	1...2.5
Объемная производительность, м ³ /с	Q	0...100
Помпажный запас по расходу, %	surgeRes	-10...100
Скорость изменения частоты вращения, (об/мин)/с	rateNst	-2000...2000
Скорость изменения перепада на конфузоре, кПа/с	rateDPconf	-100...100
Относительная частота вращения СТ (для ПХ)	normNst	0.5... 1,2
Выдаваемые на физический выход		
Задание на закрытие байпасного клапана, %	bypassSetting	0...100

Дискретные сигналы АПР

Входные сигналы

Таблица 8.6. **Обозначение входных сигналов**

Входные сигналы	Обозначение
Работа	Fl_ASwork
Закрыть	Fl_closeBypass
Открыть	Fl_openBypass
Начать помпажный тест	Fl_surgeTest
Дистанционное управление	Fl_bypassManContr
Начать отрисовку ПХ в «Аргусе»	Kn_startDraw

Выходные сигналы

Таблица 8.7. **Обозначение выходных сигналов**

Выходные сигналы	Обозначение
Предпомпажное состояние	Fr_parasurge
Работает основной контур помпажного запаса	Fr_mainSRcont
Работает первый резервный контур помпажного запаса	Fr_1resSRcont
Работает второй резервный контур помпажного запаса	Fr_2resSRcont
Отказ вычислителя помпажного запаса	Fr_SRcalcBrk
Ограничение минимального помпажного запаса	Fr_SRmin
Ограничение выходного давления	Fr_PoutLim
Ограничение степени сжатия	Fr_PRLim
Отрисовка границы помпажа в «Аргусе»	Fr_drawSurgeLine
Отрисовка точки границы помпажа	Fr_pointSurgeLine
Байпас закрывается	Fr_Kr6r_OF
Байпас открывается	Fr_Kr6r_ON

8.2 Управление регулятором

Дискретные сигналы, о которых пойдет речь ниже, являются входными по отношению к блоку антипомпажного регулирования (АПР). В зависимости от архитектуры САУ эти сигналы могут вырабатываться в управляющей программе того же контроллера, в котором функционирует АПР, а могут поступать извне.

Независимо от состояния АПР сигнал «Открыть» имеет приоритет над всеми остальными, например, одновременная подача команд «Закрыть» и «Открыть» приведет к открытию байпасного клапана.

На остановленном агрегате сигнал «Работа» = 0, сигнал «Начать помпажный тест» игнорируется, сигналы «Открыть» и «Экстренно открыть» обрабатываются одинаково: подача задания на 0% закрытия. Скорость перестановки клапана при этом не ограничивается. Сигнал «Закрыть» вызывает подачу задания на 100% закрытия, скорость перестановки также не ограничивается. При наличии сигнала «ДУ» (дистанционное управление) на кран подается задание, получаемое от оператора, скорость перестановки не ограничивается.

Фрагмент логической программы, осуществляющий управление АПР на остановленном агрегате:

Работа := FALSE ; может подаваться из барабана

Открыть := !ДУ

ДУ := (Кнопка_ДУ_включить + ДУ) * !Кнопка_ДУ_выключить

Во время пуска байпасный клапан управляется аналогично любому двухпозиционному крану, то есть подача сигналов «Закрыть» и «Открыть» вызывает перестановку с максимально возможной скоростью (при использовании клапана фирмы «Mokveld» время перестановки составляет 1...1,5 с). Сигнал «Работа» при этом должен быть равен 0, дистанционное управление на пуске должно быть запрещено. Когда ГПА выходит на «Кольцо», нужно установить равным 1 сигнал «Работа», при этом АПР будет готов к осуществлению функций антипомпажного регулирования во время перехода в магистраль и работы в магистрали. Возможная последовательность действий при пуске ГПА следующая:

ДУ := FALSE

Закрыть := Режим_пуска * !(N_{ст} > 300) ; при этом открывается кран 6

Открыть := Режим_пуска * (N_{ст} > 300)

Работа := (Прогрев + Работа) * !Останов

При работе ГПА (сигнал «Работа» для АПР выставлен в 1) управление байпасным клапаном осуществляется в соответствии с помпажным запасом. Управляющими сигналами для АПР при этом

являются: «Открыть», «Закрыть», «ДУ» и «Начать помпажный тест». При наличии сигнала «Закрыть» АПР пытается закрыть байпасный клапан, если это возможно по помпажному запасу (переход в магистраль). Скорость закрытия при этом определяется расстоянием до границы помпажа и степенью закрытия клапана. Сигнал «Открыть» вызывает открытие клапана с заданной скоростью (переход на кольцо). При необходимости открыть клапан с максимально возможной скоростью (например, при АО) нужно снять сигнал «Работа» и выставить в 1 сигнал «Открыть».

ДУ := (Кнопка_ДУ_включить + Отказ_вычислителя_помпажного_запаса + ДУ) * !Кнопка_ДУ_выключить

Работа := TRUE

Закрыть := (Переход_в_магистраль + Закрыть) * !(Переход_на_кольцо + АО)

Открыть := (Переход_на_кольцо + Открыть) * !(Переход_в_магистраль + Начать_помпажный_тест)

Сигнал дистанционного управления формируется при нажатии экранной кнопки «Включить ДУ» или при получении от АПР сигнала отказа вычислителя помпажного запаса. И в том, и в другом случае отключение режима дистанционного управления в переход в автоматический режим осуществляется только по команде оператора, то есть при нажатии кнопки «Отключить ДУ». Если режим дистанционного управления был включен автоматически по причине отказа вычислителя помпажного запаса, то оператор должен проанализировать ситуацию и только после этого переводить АПР в автоматический режим работы.

При наличии сигнала «Работа» и сигнала «ДУ» логика работы следующая: если настройки АПР (граница помпажа и коэффициенты усиления) заданы, то АПР выполняет задание оператора, ограничивая скорость и степень закрытия байпасного клапана в соответствии с помпажным запасом, если же настройки отсутствуют, то задание оператора выполняется только с ограничением скорости перестановки клапана.

Сигнал «Начать помпажный тест» вызывает постепенное закрытие байпасного клапана с целью определения границы помпажа. Подавать этот сигнал можно только на ГПА, работающем в кольцо. Закрытие прекращается и клапан открывается либо при диагностировании предпомпажного состояния нагнетателя (выполняется внут-

ри программы АПР), либо при сбросе в 0 сигнала «Начать помпажный тест». Если в процессе выполнения помпажного теста давление на выходе нагнетателя превысило максимально допустимое, то байпасный клапан останавливается в постоянном положении. Для его открытия необходимо сбросить в 0 сигнал «Начать помпажный тест». *Внимание! Для нормальной работы помпажного тестирования необходимо сбрасывать сигнал «Открыть» (см. пример выше), так как сигнал открытия имеет приоритет, следовательно, при его наличии не будет выполняться закрытие с целью определения границы помпажа.*

Начать_помпажный_тест := Кольцо * (Кнопка_начала_тестирования + Начать помпажный тест) * !Кнопка_отключения_тестирования

При нормальном останове ГПА нужно подать команду «Открыть» для перехода на кольцо, а после охлаждения ГПА сбросить в 0 сигнал «Работа».

Для осуществления аварийного останова по помпажу нагнетателя предназначен сигнал «Предпомпажное состояние», поступающий от АПР. Сам этот сигнал является предупреждением, его необходимо подавать на вход таймера длительностью 2 с, выходом этого таймера является аварийный сигнал «Помпаж нагнетателя», включаемый в сборку «АО со стравливанием».

8.3 Помпажный тест

Определение коэффициента конфузора

Объемная производительность нагнетателя определяется по перепаду на конфузоре по следующей формуле:

$$Q = \frac{A_K}{60} \sqrt{\frac{\Delta P_{\text{КОНФ}} \cdot 101,97}{\rho_H}}, \quad (8.1)$$

где Q – объемная производительность нагнетателя, м³/с;

A_K – коэффициент конфузора, м²/мин;

$\Delta P_{\text{КОНФ}}$ – перепад давлений на конфузоре, кПа;

ρ_H – плотность газа по условиям на входе нагнетателя, кг/м³.

Плотность газа по условиям на входе нагнетателя ρ_H определяется по формуле:

$$\rho_H = \frac{P_{BX.H} \cdot 10^3}{R \cdot T_{BX.H} \cdot Z_{BX.H}}, \quad (8.2)$$

где $P_{BX.H}$ – абсолютное давление газа на входе нагнетателя, МПа;

$T_{BX.H}$ – температура газа на входе нагнетателя, К;

$Z_{BX.H}$ – коэффициент сжимаемости на входе нагнетателя;

R – газовая постоянная природного газа, кДж/кг·К.

Коэффициент сжимаемости на входе нагнетателя $Z_{BX.H}$ определяется по формуле:

$$Z = 1 - \left[(10,2 \cdot P - 6) \cdot (0,345 \cdot 10^{-2} \cdot d - 0,446 \cdot 10^{-3}) + 0,015 \right] \times \\ \times \left[1,3 - 0,0144 \cdot (T - 283,15) \right], \quad (8.3)$$

где P – абсолютное давление газа, МПа;

T – температура газа, К;

d – относительная плотность газа по воздуху.

Из формулы (8.1) с учетом формул (8.2), (8.3) можно определить коэффициент конфузора:

$$A_K = 60 \cdot Q \sqrt{\frac{\rho_H}{\Delta P_{KOHФ} \cdot 101,97}}. \quad (8.4)$$

Для определения коэффициента конфузора по вышеприведенным формулам служит лист «Коэффициент_конфузора» файла «Коэффициенты АПР.xls». Определение производится путем снятия нескольких рабочих точек нагнетателя (группа «Измеряемые параметры») и привязки их к ГДХ нагнетателя или показаниям расходомерного устройства (при его наличии). В случае использования ГДХ нагнетателя для каждой строки необходимо заполнить значения в группе «Пересчет из ГДХ». При этом в столбце « Q , м³/с» в группе «Расчетные параметры» автоматически рассчитывается значение объ-

емной производительности для соответствующей рабочей точки. При наличии расходомерного устройства необходимо вручную рассчитать и заполнить столбец « Q , м³/с» в группе «Расчетные параметры». Пересчет из объемной производительности в коммерческую и обратно осуществляется по следующей формуле:

$$Q_C = Q \cdot P \cdot 10,2 \cdot \frac{288}{T \cdot Z}, \quad (8.5)$$

где Q_C – коммерческая производительность, нм³/ед. времени;
 Q – объемная производительность, м³/ед. времени;
 P – абсолютное давление газа, МПа;
 T – температура газа, К;
 Z – коэффициент сжимаемости газа.

Также для всех расчетов необходимо заполнить информацию по составу газа (столбец Р на листе «Коэффициент_конфузора».

Проведение помпажного тестирования

Этот режим работы предназначен для определения границы помпажа (помпажных характеристик – ПХ) нагнетателя и может быть сформирован только при работе ГПА на «Кольцо».

Определение линии помпажа производится с целью уточнения газодинамических характеристик (ГДХ) нагнетателя, построенных по характеристикам завода-изготовителя, либо для выявления реальной границы помпажа нагнетателя в отсутствие заводских характеристик.

Для проведения помпажного теста необходимо подготовить групповой график, на который вывести:

- частоту вращения СТ, об/мин;
- температуру газа на входе нагнетателя, °С;
- перепад давления на конфузоре нагнетателя, кПа;
- давление газа на входе нагнетателя, МПа;
- давление газа на выходе нагнетателя, МПа;
- степень закрытия байпасного клапана (если нет датчика положения, то выводится задание на байпасный клапан), %;
- виброперемещение задней опоры нагнетателя (ЗОН), мкм;
- виброперемещение передней опоры нагнетателя (ПОН), мкм;
- значение осевого сдвига ротора нагнетателя, мм.

Перевести групповой график в режим слежения.

Вывести агрегат на «Кольцо».

Для прекращения помпажного теста при возникновении каких-либо экстремальных ситуаций (например, виброперемещения опор нагнетателя превысили допустимые значения) необходимо вывести на экран кнопку «Помпажный тест – отключить» в удобное место, чтобы в любой момент она была доступна.

Выбрать 4 значения частоты вращения СТ, при которых будет проводиться помпажный тест. Эти значения выбираются следующим образом:

- Минимальная и максимальная точки соответствуют минимальной и максимальной частотам вращения газогенератора, а еще две точки равномерно распределены по полученному диапазону. Например, если при работе газогенератора на максимальной частоте вращения частота вращения СТ равна 7500 об/мин, а при работе газогенератора на минимальной частоте вращения частота вращения СТ равна 6000 об/мин, то для помпажного тестирования выбираются частоты вращения 6000, 6500, 7000 и 7500 об/мин.

- Установить нужную частоту вращения ротора СТ кнопками управления РЧВ или при помощи числового задания на частоту вращения. При наличии микропроцессорной САУ двигателя необходимо, чтобы она работала в режиме стабилизации частоты вращения СТ. Рекомендуется проводить помпажные тесты в порядке возрастания оборотов СТ.

- В режиме «Кольцо» запустить помпажный тест нажатием экранной кнопки «Помпажный тест – включить». При этом подается управляющее воздействие, закрывающее байпасный клапан. При достижении помпажной точки клапан открывается с максимальной скоростью (время открытия составляет не более 2,5 с).

- В режиме испытаний АПР сигнализатор помпажа выдает сигнал «Предпомпаж нагнетателя», по которому регистрируется точка помпажа и открывается байпасный клапан, но авария по помпажу блокируется и аварийного останова агрегата не происходит.

ПРИМЕЧАНИЕ: При проведении помпажного теста возможно возникновение ситуации, когда виброперемещения превысят значения допустимых (предупредительных) уставок, что приведет к аварийному останова агрегата. В этом случае помпажный тест необходимо прекращать нажатием кнопки «Помпажный тест – отключить».

Вне зависимости от того, автоматически завершился помпажный тест или прекращен вручную, по групповому графику необходимо зафиксировать значения всех выведенных аналоговых параметров, соответствующие началу открытия байпасного клапана.

Для достижения наилучших результатов испытаний необходимо данную процедуру провести три раза для каждого значения частоты вращения СТ.

Результаты определения границы помпажа, т.е. частота вращения СТ, давление на входе и выходе нагнетателя, перепад давлений на конфузоре нагнетателя и температура газа на входе нагнетателя для каждой точки границы помпажа должны быть занесены в сменный журнал по данному ГПА или зафиксированы путем распечатки значений аналоговых параметров.

Вычисление коэффициентов аппроксимации границы помпажа

Информация о положении границы помпажа вносится в САУ в виде настроек коэффициентов полиномов, аппроксимирующих линию помпажа в трех различных системах координат (см. техописание подсистемы АПР). Для вычисления коэффициентов аппроксимации предназначен файл «Конфигуратор АПР.xls». В этом файле имеется лист «Коэффициенты_ПХ», на котором при обработке результатов помпажного тестирования заполняются следующие столбцы: «Nст, об/мин; Pвх, МПа; Pвых, МПа; dPконф, кПа; Tвх, град. Цельсия». В эти столбцы помещаются данные, полученные при регистрации помпажных точек. Также заполняются ячейки «Номинальные обороты СТ, об/мин; Температура привед., град. Цельсия; Плотность при НУ, кг/м³». После заполнения этих ячеек следует нажать экранную кнопку «Эксперимент. коэффициенты», при этом будет выполнен расчет коэффициентов аппроксимирующих полиномов с занесением результата в ячейки листа «Результаты».

9 СИСТЕМА КОМПЛЕКСНОГО УПРАВЛЕНИЯ ГПА

Наиболее полно системы комплексного управления нашли свое отражение в разработке ЗАО Система-Сервис, все более широко внедряемой в практику работы компрессорных станций Газпрома. Такая система (МСКУ 5000-01-11-04) [12] и использована при подготовке настоящего раздела учебника.

Система комплексного управления мультипроцессорная МСКУ 5000-01-11-04 (в дальнейшем – система, обозначение – СС.421457.01-11-04) предназначена для управления газоперекачивающим агрегатом (ГПА) с газотурбинным двигателем, центробежным нагнетателем и вспомогательным оборудованием.

Система создана на базе программно-технического комплекса (в дальнейшем ПТК) Simatic фирмы Siemens.

Система предназначена для эксплуатации при температуре окружающего воздуха от 5 до 50°C и относительной влажности до 80 % при 35 °С и более низких температурах без конденсации влаги.

По стойкости к механическим воздействиям исполнение системы виброустойчивое по ГОСТ 12997; группа исполнения N3 (L3 – для панели управления).

По устойчивости к воздействию атмосферного давления исполнение системы соответствует группе P1 по ГОСТ 12997.

Система сохраняет свои характеристики при воздействии постоянных магнитных полей и переменных полей сетевой частоты с напряженностью 400 А/м.

Система устойчива к воздействию радиочастотных электромагнитных полей степени жесткости 2 по ГОСТ Р 51317.4.3 (напряженность испытательного поля – 130 дБмкВ/м (3 В/м)).

Система устойчива к воздействию микросекундных импульсных помех степени жесткости 3 по ГОСТ Р 51317.4.5 от сети питания:

- максимальная амплитуда для симметричной помехи – не более 1 кВ;

- максимальная амплитуда для асимметричной помехи – не более 2 кВ.

Система устойчива к воздействию наносекундных импульсных помех степени жесткости 3 по ГОСТ Р 51317.4.4 от сети питания:

- максимальная амплитуда для симметричной помехи – не более 1 кВ;
- максимальная амплитуда для асимметричной помехи – не более 2 кВ.

Система предназначена для установки вне взрывоопасных помещений и наружных установок, но имеет исполнения с входными и выходными искробезопасными электрическими цепями уровня *iv* и маркировкой ExibIIC, соответствующими требованиям ГОСТ Р 51330.10, для подключения аналоговых датчиков и выдачи сигналов на исполнительные механизмы, устанавливаемые во взрывоопасных зонах помещений и наружных установок согласно п. 7.3 ПУЭ. Взрывозащищенность электрических цепей системы обеспечивается модулями ввода и вывода аналоговых сигналов SIMATIC S7 или барьерами искробезопасности.

Устройства системы конструктивно размещаются в четырех шкафах, устанавливаемых в блоке автоматики ГПА. Шкафы имеют степень защиты от воздействия окружающей среды IP54 по ГОСТ 14254.

9.1 Технические характеристики

Система обеспечивает выполнение полного комплекса управляющих, информационных функций, а также функций регулирования и контроля, необходимых для функционирования ГПА.

К функциям управления относятся:

- снятие запретов на срабатывание защит на остановленном агрегате с целью проверки и сдачи защит перед пуском ГПА;
- автоматическая проверка пусковой готовности ГПА;
- автоматическая защита ГПА по технологическим параметрам;
- автоматический пуск ГПА по заданному алгоритму (из резерва с заполненным или незаполненным контуром нагнетателя) с выводом на необходимые рабочие режимы (например, «Кольцо», «Магистраль»);

- комплексная проверка кранов – «КПК»;
- автоматический перевод ГПА из одного рабочего режима в другой (например, из режима «Кольцо» в режим «Магистраль» или обратно) по заданию оператора или в соответствии с командами, приходящими из САУ вышестоящего уровня;
- автоматическое управление исполнительными механизмами и кранами газовой обвязки ГПА по заданным алгоритмам;
- автоматический нормальный останов ГПА по заданному алгоритму;
- автоматический аварийный останов ГПА со стравливанием и без стравливания газа по сигналам каналов защиты либо по команде оператора;
- экстренный аварийный останов ГПА по заданному алгоритму по команде оператора при непредвиденных обстоятельствах;
- автоматический перезапуск с интервалом 3 с вспомогательных механизмов после кратковременного (1...5 с) провала напряжения 380 В 50 Гц;
- дистанционное управление исполнительными механизмами и вспомогательным оборудованием на работающем или неработающем агрегате;
- взаимодействие с системой автоматического пожаротушения;
- управление утилизатором тепла, включая регулирование температуры воды на выходе утилизатора;
- запрет выполнения команд оператора при работе агрегата в автоматическом режиме, если они не предусмотрены алгоритмом управления.

К функциям регулирования относятся:

- автоматический запуск двигателя (с обеспечением заданного расхода топливного газа при розжиге) с автоматическим учетом температуры и давления топливного газа, температуры и давления окружающего воздуха, а также с анализом наличия факела в камере сгорания по температурному броску в момент розжига и контролем скорости изменения температуры продуктов сгорания;

- автоматическое регулирование частоты вращения ГГ;
- автоматическое регулирование частоты вращения силовой турбины (СТ) на рабочих режимах в соответствии с заданием, получаемым от оператора или от САУ вышестоящего уровня;
- предотвращение аварии по оборотам при разгрузке СТ в случае помпажа нагнетателя;
- ограничение максимальной и минимальной частот вращения ГГ и СТ;
- ограничение максимального давления на выходе осевого компрессора;
- ограничение скорости изменения расхода топлива (защита от погасания факела);
- антипомпажное регулирование и защита нагнетателя, обеспечивающие расстояние между рабочей точкой нагнетателя и линией помпажа в пределах 5-15% от помпажного расхода (при стационарном режиме работы с частичным байпасированием), а также антипомпажную защиту нагнетателя при резких возмущающих воздействиях (независимо от помпажного запаса).

К информационным функциям относятся:

- непрерывная или по вызову обслуживающего персонала индикация на дисплее рабочей станции значений измеряемых и расчетных технологических параметров агрегата в единицах физических величин по ГОСТ 8.417;
- представление на дисплее рабочей станции мнемосхем агрегата с указанием значений измеряемых параметров и положений исполнительных механизмов;
- постоянное представление на дисплее панели резервного управления значений основных технологических параметров агрегата, таких как температура газа перед СТ, частота вращения СТ, перепад давления «масло–газ» и др;
- обнаружение и представление на дисплее рабочей станции информации об изменении состояния оборудования ГПА;
- представление на дисплее рабочей станции аварийно-предупредительной сигнализации, включая сообщения о блокировке дистанционного управления исполнительными механизмами ГПА при попытке некорректного управления;

- представление информации о невыполненных предпусковых условиях;
- представление обслуживающему персоналу информации о невыполнении или невозможности выполнения того или иного этапа реализации функций контроля, управления и регулирования по причине неисправности какого-либо датчика, исполнительного механизма или при изменении режима работы ГПА;
- представление информации об основных режимах работы агрегата (например, «Готов к пуску», «Пуск», «Нормальный останов», «Аварийный останов», «КПК» и т.д.);
- запоминание сигналов, вызвавших аварийный останов, а также значений основных технологических параметров агрегата при срабатывании аварийной защиты с возможностью ретроспективного анализа состояния агрегата;
- представление обслуживающему персоналу информации о неисправности аппаратуры системы;
- представление информации о невыполнении команд управления и регулирования, неисправности цепей управления исполнительными механизмами или отсутствии напряжения на исполнительных механизмах;
- формирование и представление на дисплее рабочей станции массивов текущей и ретроспективной информации в виде непрерывно обновляемых файлов;
- формирование массивов информации для регистрации на принтере (периодически или по вызову оператора) необходимой отчетной документации;
- вычисление параметров (при отсутствии возможности их прямого измерения);
- обмен информацией с САУ вышестоящего уровня.

К функциям контроля относятся:

- автоматический непрерывный контроль целостности цепей управления исполнительными механизмами, участвующими в аварийной защите;
- автоматический непрерывный контроль целостности цепей аналоговых и дискретных датчиков, ответственных за аварийную защиту;

- автоматический контроль исправности основных программно-технических средств (ПТС) системы с сигнализацией отказа;
- защита ПТС от несанкционированного доступа.

Система обеспечивает взаимодействие с системой автоматического управления компрессорным цехом (САУ КЦ), системой диагностики и контроля компрессорного оборудования (СДКО), автоматической системой контроля выбросов загрязняющих веществ (АС-КЗВ) и счетчиком электроэнергии.

Измерительные каналы системы обеспечивают измерение технологических параметров и сравнение с заданными значениями установок (предупредительных и аварийных), значения которых приведены в документе СС.421457.01-11-04 Д50.

Система обеспечивает прием, преобразование и представление в виде значений физической величины аналоговых сигналов:

- от термопреобразователей сопротивления (ТС) по ГОСТ 6651;
- преобразователей термоэлектрических (ТП) по ГОСТ 8.585;
- преобразователей давления, перепада давления, уровня, влажности, виброперемещения, виброскорости, осевого сдвига, положения регулируемого клапана (нормированные сигналы силы и напряжения постоянного тока) по ГОСТ 26.011, а также выдачу по каналам аналогового управления сигналов силы постоянного тока.

Приведенная погрешность (без учета погрешности датчиков) каналов измерения технологических параметров (кроме частоты вращения) и сигнализации их отклонений от заданных предельных значений, а также каналов аналогового управления не должна выходить за пределы допускаемых значений, равных $\pm 0,5$ %.

Приведенная погрешность каналов измерения и сигнализации для частоты вращения не должна выходить за пределы допускаемых значений, равных $\pm 0,05$ %.

Приведенная погрешность измерительных каналов (ИК) и каналов аналогового управления (КУ) системы не должна выходить за пределы допускаемых значений при следующих условиях:

- температура окружающего воздуха от 5 до 50 °С;
- относительная влажность воздуха до 80 %;
- атмосферное давление от 84 до 107 кПа.

Система обеспечивает формирование выходных аналоговых сигналов силы постоянного тока 4–20 мА.

Система обеспечивает прием дискретных входных сигналов типа «сухой» контакт.

Система формирует команды управления исполнительными механизмами в виде дискретных сигналов, обеспечивающих коммутацию цепей:

- постоянного тока напряжением 220 В при токе до 0,5 А;
- постоянного тока напряжением 24 В при токе до 5 А;
- переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц при токе до 1 А.

В системе обеспечено гальваническое разделение между внутренними цепями управления и цепями датчиков и исполнительных механизмов.

Цикл обновления выходных команд логического управления не превышает 0,25 с. Для отдельных быстродействующих исполнительных механизмов (например, стопорного клапана) должна быть предусмотрена возможность уменьшения цикла до 0,10 с.

Цикл обновления выходного управляющего воздействия в системе по управлению антипомпажным клапаном не превышает 20 мс.

Цикл обновления выходного управляющего воздействия в системе регулирования двигателем не превышает 20 мс. Для отдельных исполнительных механизмов двигателя (например, ВНА) транспортное запаздывание не более 10 мс.

Обновление информации о значении постоянных индицируемых параметров происходит не реже 1 раза в секунду.

Электропитание системы осуществляется от двух независимых сетей энергоснабжения:

- основной – переменного тока напряжением (220 +22;-33) В, частотой (50 ± 1) Гц;
- резервной – постоянного тока напряжением (220+22;-33)В.

Напряжения питания подаются через автоматические выключатели. Переход с основной сети на резервную и обратно осуществляется автоматически без потери работоспособности системы. Одновременное отключение обеих сетей недопустимо.

Мощность, потребляемая системой при номинальных напряжениях питания, составляет:

- от сети переменного тока – не более 1,5 кВ·А;
- сети постоянного тока (при отсутствии основной сети ~220 В) – не более 1,5 кВт.

Срок службы системы – не менее 15 лет.

Средняя наработка на отказ типа «пропуск аварии ГПА» при работе системы в нормальных климатических условиях испытаний по ГОСТ 15150 – не менее 200000 ч.

Под отказом типа «пропуск аварии ГПА» понимается неисправность, заключающаяся в отсутствии любой из команд управления аварийным останом ГПА на выходах системы при наличии любого аварийного сигнала на входах.

9.2 Состав, устройство и работа системы

Система состоит из следующих функциональных узлов (рис.9.1):

- устройства управления и регулирования UCR – 1шт;
- расширителя №1 устройства управления и регулирования EU1 – 1шт;
- расширителя №2 устройства управления и регулирования EU2- 1шт;
- устройства бесперебойного электропитания UPS– 1 шт;
- панели управления;
- блока связи БС-4;
- блока защиты агрегата БЗА-09.

Устройство управления и регулирования (UCR) обеспечивает:

- обработку и преобразование информации, полученной от блоков связи с объектом;
- хранение и реализацию алгоритмов управления;
- формирование по заданным алгоритмам команд управления;
- формирование массивов информации для организации обмена со средствами представления и обмена с системой верхнего уровня;
- выполнение задач регулирования работы двигателя и антипомпажного регулирования нагнетателя.

Панель управления предназначена для резервирования основных функций контроля и управления ГПА.

Блок связи БС-4 предназначен для сопряжения каналов оптической связи с каналами электропроводной связи.

Блок защиты агрегата (BSC) обеспечивает защиту ГПА от превышения предельных значений параметров ГПА в рабочем режиме в случае неисправности контроллеров устройства управления.

Комплект оборудования электропитания системы мониторинга BN3500 предназначен для обеспечения этой аппаратуры электропитанием ~ 220 В и ≈ 24 В.

Коммуникационные сети

Технические средства фирмы «Siemens» позволяют использовать для обмена данными два вида промышленных сетей PROFIBUS-DP и Industrial Ethernet.

PROFIBUS-DP

Сеть PROFIBUS-DP служит для обмена данными между устройствами системы и серверами Аргус. Скорость передачи данных по сети PROFIBUS-DP до 12 Мбит/с в зависимости от длины сегмента.

Электрические каналы связи PROFIBUS выполняются экранированной витой парой. Кабели имеют различные исполнения. Они могут прокладываться открыто или в земле, а также обеспечивать высокую стойкость к воздействию агрессивных сред. Кабели имеют двойное экранирование, что обеспечивает их высокую помехозащищенность передачи информации.

Industrial Ethernet (Промышленная локальная сеть)

Сеть Industrial Ethernet служит для обмена данными между МСКУ и серверами Аргус. Скорость передачи данных по Industrial Ethernet до 100 Мбит/с.

Клиентская сеть Ethernet обеспечивает обмен данными между пультовыми ЭВМ и серверами Аргус, что обеспечивает большую скорость передачи данных и возможность установки удаленных терминалов.

Industrial Ethernet – это промышленная сеть, отвечающая требованиям международного стандарта IEEE 802.3. Она использует CSMA-CD процедуры доступа (коллективный доступ к сети с обнаружением конфликтов), отвечающие требованиям стандарта IEEE 802.3 (Ethernet). Сеть поддерживает следующие протоколы:

- MAP (Manufacturing Automation Protocol – протокол производственной автоматике);
- TF (Technological Function – протокол технологических функций);
- S7 (функции для связи с изделиями SIMATIC S7);
- SEND/RECEIVE (связь между изделиями SIMATIC S5 и SIMATIC S7).

К сети Industrial Ethernet могут подключаться:

- программируемые контроллеры SIMATIC S7-400 и S7-300;
- программируемые контроллеры SIMATIC S5;
- программаторы и компьютеры;
- сертифицированные системы других фирм-изготовителей.

Контроль целостности цепи аналоговых датчиков

Контроль цепи аналоговых датчиков реализован программно в модулях ввода аналоговых сигналов SM 431. Диагностический блок данных, описывающий состояние измерительных цепей, доступен центральному процессору, который считывает информацию либо по программе, либо по прерыванию от SM 431.

Контроль целостности цепи дискретных датчиков

В системе организован контроль входных цепей дискретных датчиков, электропитание которых осуществляется от блоков питания системы. Контроль осуществляется посредством дискретного модуля SM 421-7BH00. Данный модуль размещается в блоке расширения. Модуль контролирует внутренние и внешние неисправности/ошибки. Диагностическая функция модуля в случае появления ошибки индицируется с помощью диагностической записи.

Контроль целостности цепи исполнительных механизмов

Для ИМ, управляемых от ПВУ-8, контроль целостности цепи управления реализован на плате ПВУ-8.

Организация электропитания системы

Для обеспечения заданных надежностных характеристик система электропитания выбрана двухканальной.

Электропитание системы осуществляется от двух независимых сетей энергоснабжения:

- основной – переменного тока напряжением (220 +22;-33) В, частотой (50 ± 1) Гц;
- резервной – постоянного тока напряжением (220 +22;-33) В.

Основная сеть представляет собой фазное напряжение трехфазной сети 380 В, заземленной нейтрально. Резервное питание осу-

ществляется от аккумуляторов, установленных на газоперекачивающих компрессорных станциях. Резервная сеть обеспечивает систему электроэнергией при пропадании основной сети.

Во время работы осуществляется контроль напряжения питания: ~ 220 В и ≈ 220 В, для этого установлены реле контроля напряжения (К1, К2). Для контроля подачи питания на краны установлено реле контроля напряжения (К3).

Конструктивное исполнение

Технические средства системы размещаются в четырех приборных шкафах с учетом следующих критериев:

- удобство обслуживания и проведения монтажных, пусконаладочных и регламентных работ;
- минимизация протяженности электрических соединений;
- создание оптимального теплового режима.

9.3 Порядок расчета вычисляемых параметров [17]

а) Расчет объемной производительности нагнетателя Q ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$Q = k \sqrt{\frac{\Delta P_K}{\rho_H}}, \quad (9.1)$$

где k – коэффициент пропорциональности конфузора (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор»), для ГПА-Ц-16/76-1,44 $k = 43,95$;

ΔP_K – перепад давления на конфузоре нагнетателя (вычисляется на основании измерения выходного сигнала штатного первичного преобразователя давления), $\text{кгс}/\text{см}^2$;

ρ_H – плотность газа по условиям всасывания, $\text{кг}/\text{м}^3$.

$$\rho_H = \frac{\rho \cdot (P_{ИВХ} + P_B) \cdot T}{P \cdot (t + T_0) \cdot Z}, \quad (9.2)$$

где ρ – плотность газа при нормальных условиях ($P=1,033$ $\text{кгс}/\text{см}^2$ и $T=293,15$ К), вводится и периодически корректируется оператором на основании данных, полученных от диспетчера из химлаборатории, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$P_{ИВХ}$ – избыточное давление газа на входе в нагнетатель (вычисляется на основании измерения выходного сигнала штатного первичного преобразователя давления), кгс/см²;

P_B – барометрическое давление (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор»), $P_B = 1$, кгс/см²;

$T = 293,15$ К – температура в Кельвинах, соответствующая 20 °С;

$P = 1,033$ кгс/см²;

t – температура газа на входе в нагнетатель (вычисляется на основании измерения выходного сигнала штатного первичного преобразователя температуры), °С;

$T_o = 273,15$ К – температура в Кельвинах, соответствующая 0 °С;

Z – коэффициент сжимаемости газа.

$$Z = \frac{\left(1 + \frac{1,32 \cdot 10^{-3}}{T_C^{3,25}}\right)^2}{\left(\frac{B_1}{B_2} - B_2 + \frac{Q2}{3}\right)} P_C, \quad (9.3)$$

где T_C – приведенная абсолютная температура, промежуточная величина, используемая для расчета коэффициента сжимаемости газа Z .

$$T_C = 0,71892 \cdot T_{ПР}, \quad (9.4)$$

где $T_{ПР}$ – приведенная температура газа.

$$T_{ПР} = \frac{t + T_0}{T_{КР}}, \quad (9.5)$$

где $T_{КР}$ – абсолютная критическая температура газа, К.

$$T_{КР} = 88,25 \cdot \left[1,7591 \cdot (0,56364 + \rho) - \left(\frac{N_{CO_2}}{100} + 1,681 \cdot \frac{N_{N_2}}{100}\right)\right], \quad (9.6)$$

где N_{CO_2} – объемная концентрация углекислого газа (вводится и периодически корректируется оператором на основании данных, полученных от диспетчера из химлаборатории), %;

N_{N_2} – объемная концентрация азота (вводится и периодически корректируется оператором на основании данных, полученных от диспетчера), %;

B_1 – промежуточная величина, используемая для расчета коэффициента сжимаемости газа Z ,

$$B_1 = \frac{(300 - Q_1 \cdot Q_2^2)}{9 \cdot Q_1}, \quad (9.7)$$

где Q_1 – промежуточная величина, используемая для расчета коэффициента сжимаемости газа Z .

$$Q_1 = \frac{\left(\frac{1,61353}{T_C^2} - 2,21323 \right)}{T_C} + 3,30378, \quad (9.8)$$

где Q_2 – промежуточная величина, используемая для расчета коэффициента сжимаемости газа Z .

$$Q_2 = \frac{\left(\frac{4,57697}{T_C^2} + 26,5827 \right)}{T_C} - 13,3185, \quad (9.9)$$

где B_2 – промежуточная величина, используемая для расчета коэффициента сжимаемости газа Z .

$$B_2 = \sqrt[3]{B_0 + \sqrt{(B_0^2 + B_1^3)}}, \quad (9.10)$$

где B_0 – промежуточная величина, используемая для расчета коэффициента сжимаемости газа Z .

$$B_0 = \frac{\left(\frac{450 - Q_1 \cdot Q_2^2}{27} \right) \cdot Q_2 - 50 \cdot P_C \cdot F}{Q_1}, \quad (9.11)$$

где F – промежуточная величина, используемая для расчета коэффициента сжимаемости газа Z . Значение F вычисляется в зависимости от значений P_C и T_C :

$F = F_1$, если $0,0147 \leq P_C \leq 1,3$ и $0,84 \leq T_C \leq 1,09$ или

$F = F_2$, если $0,0147 \leq P_C \leq 2$ и $1,09 \leq T_C \leq 1,4$;

F_1 – промежуточная величина, используемая для расчета F .

$$F_1 = 1 - 75 \cdot 10^{-5} \cdot P_C \cdot (P_C^{1,3} (2 - e^{-20(1,09 - T_C)}) + 1756 \cdot (1,09 - T_C)^4 \cdot (1,69 - P_C^2)); \quad (9.12)$$

F_2 – промежуточная величина, используемая для расчета F

$$F_2 = 1 - 10^{-3} \cdot P_C \cdot (P_C^{1,3} (2 - e^{-20(1,09 - T_C)}) + 1756 \cdot (1,09 - T_C)^4 \cdot (1,69 - P_C^2)), \quad (9.13)$$

где P_C – приведенное абсолютное давление, промежуточная величина, используемая для расчета коэффициента сжимаемости газа Z .

$$P_C = 0,6714 \cdot P_{\text{ПР}}, \quad (9.14)$$

где $P_{\text{ПР}}$ – приведенное давление газа.

$$P_{\text{ПР}} = \frac{P_{\text{ИВХ}} + P_{\text{Б}}}{P_{\text{КР}}}, \quad (9.15)$$

где $P_{\text{КР}}$ – абсолютное критическое давление газа, кгс/см².

$$P_{\text{КР}} = 30,168 \left(0,05993(26,831 - \rho) + \left(\frac{N_{\text{CO}_2}}{100} - 0,392 \frac{N_{\text{N}_2}}{100} \right) \right). \quad (9.16)$$

б) Расчет запаса по помпажу нагнетателя δQ , %:

$$\delta Q = \frac{Q_{\text{ПР}} - Q_{\text{ПРmin}}}{Q_{\text{ПРmin}}} \cdot 100, \quad (9.17)$$

где $Q_{\text{ПР}}$ – приведенная производительность нагнетателя, м³/с;

$$Q_{\text{ПР}} = Q \frac{n_H}{n}, \quad (9.18)$$

где Q – объемная производительность нагнетателя, вычисленная ранее, м³/с;

$Q_{\text{ПРmin}}$ – минимальная приведенная объемная производительность нагнетателя для данной приведенной относительной частоты ротора нагнетателя, м³/с (табл. 9.1);

$N_{\text{ПР}}$ – приведенная относительная частота вращения ротора нагнетателя.

$$N_{\text{ПР}} = \frac{n}{n_H} \cdot \sqrt{\frac{Z_{\text{ПР}} \cdot T_{\text{Н ПР}} \cdot R_{\text{ПР}}}{Z \cdot R \cdot (t + T_0)}}, \quad (9.19)$$

где n_H – частота приведения (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор»), $n_H = 4900$ об/мин;

n – обороты ротора нагнетателя (вычисляется на основании измерения выходного сигнала штатного первичного преобразователя оборотов), об/мин;

$Z_{\text{ПР}}$ – приведенный коэффициент сжимаемости газа (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор»), $Z_{\text{ПР}} = 0,901$;

$T_{\text{Н ПР}}$ – приведенная температура газа на входе в нагнетатель (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор»), $T_{\text{Н ПР}} = 288$ К;

$R_{\text{ПР}}$ – приведенная газовая постоянная (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор»), $R_{\text{ПР}} = 508,16$ Дж / (кг·К);

Z – коэффициент сжимаемости газа, вычисленный по формуле (9.3);

t – температура газа на входе в нагнетатель (вычисляется на основании измерения выходного сигнала штатного первичного преобразователя температуры), °С;

T_0 – температура в Кельвинах, соответствующая 0°С, $T_0 = 273,15$ К;

R – газовая постоянная перекачиваемого газа, Дж / (кг·К);

$$R = \frac{R_B}{\Delta}, \quad (9.20)$$

где R_B – газовая постоянная воздуха (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор»), $R_B = 286,8$ Дж / (кг·К);

Δ – относительная плотность газа по воздуху,

$$\Delta = \frac{\rho}{1,205}, \quad (9.21)$$

где ρ – плотность газа при нормальных условиях ($P = 1,033$ кгс/см² и $T = 293,15$ К), вводится и периодически корректируется оператором на основании данных, полученных от диспетчера, кг/м³.

**Таблица 9.1. Зависимость минимальной приведенной
объемной производительности нагнетателя от приведенных
относительных оборотов ($n_{\text{ПР}}$)**

$n_{\text{ПР}}$	0,81	0,85	0,9	0,95	1,0	1,05	1,1	1,14
$Q_{\text{ПР.min}}, \text{ м}^3/\text{с}$	4,78	4,79	4,8	4,89	5,04	5,05	5,08	5,1

в) Расчет массовой производительности нагнетателя Q_M , кг/с:

$$Q_M = Q \cdot \rho_H, \quad (9.22)$$

где Q – объемная производительность нагнетателя, $\text{м}^3/\text{с}$;
 ρ_H – плотность газа по условиям всасывания, $\text{кг}/\text{м}^3$.

г) Расчет политропического КПД нагнетателя:

– политропический КПД нагнетателя для вычисленной приведенной производительности нагнетателя, находится из табл. 9.2 по рассчитанным $Q_{\text{ПР}}$.

**Табл. 9.2. Зависимость политропического КПД нагнетателя
от приведенной объемной производительности нагнетателя**

$Q_{\text{ПР}}, \text{ м}^3/\text{с}$	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8
КПД _{пол}	0,740	0,757	0,768	0,780	0,792	0,804	0,814	0,822	0,830	0,838	0,845	0,849

Продолжение табл. 9.2

$Q_{\text{ПР}}, \text{ м}^3/\text{с}$	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8	8,85
КПД _{пол}	0,852	0,854	0,852	0,849	0,846	0,840	0,836	0,825	0,817	0,808	0,800

д) Расчет внутренней мощности, потребляемой нагнетателем N_i , кВт:

$$N_i = \rho_H \cdot N_{i \text{ ПР}} \cdot \left(\frac{n}{n_H} \right)^3, \quad (9.23)$$

где N_i пр – приведенная относительная внутренняя мощность нагнетателя, находится из табл. 9.3 по рассчитанным $Q_{пр}$ (9.18), кВт/(кг/м³);

n_H – частота приведения (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор») $n_H = 4900$ об/мин;

n – обороты ротора нагнетателя (вычисляются на основании измерения выходного сигнала штатного первичного преобразователя оборотов), об/мин.

Таблица 9.3 – Зависимость приведенной относительной внутренней мощности от приведенной объемной производительности нагнетателя

$Q_{пр},$ м ³ /с	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8
$N_{пр},$ кВт (кг/м ³)	334	342	348	354	362	368	374	379	384	390	394	398

Продолжение табл. 9.3

$Q_{пр},$ м ³ /с	7,0	7,2	7,4	7,6	7,8	8,0	8,2	8,4	8,6	8,8	8,85
$N_{пр},$ кВт/(кг/м ³)	402	405	409	412	414	417	419	422	424	426	427

е) Расчет мощности на муфте нагнетателя N , кВт:

$$N = N_i + N_{МЭХ}, \quad (9.24)$$

где N_i – внутренняя мощность, потребляемая нагнетателем (9.23), кВт;

$N_{МЭХ}$ – механические потери в редукторе и подшипниках нагнетателя при номинальной нагрузке для ГПА-Ц-16 (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор») =140 кВт.

ж) Расчет степени сжатия ε :

$$\varepsilon = \frac{P_{И Вых} + P_B}{P_{И Вх} + P_B}, \quad (9.25)$$

где $P_{И\ Вых}$ – избыточное давление газа на выходе из нагнетателя (вычисляется на основании измерения выходного сигнала штатного первичного преобразователя давления), кгс/см²;

$P_{И\ Вх}$ – избыточное давление газа на входе в нагнетатель (вычисляется на основании измерения выходного сигнала штатного первичного преобразователя давления), кгс/см²;

P_B – барометрическое давление (константа, изменяемая оператором в режиме «Администратор»), $P_B = 1$ кгс/см².

9.4 Использование системы

Управление режимом работы ГПА

Управление ГПА оператором осуществляется при помощи рабочей станции системы и панели резервного управления.

При работе с панелью резервного управления оператор использует индивидуальные кнопки управления. При нажатии кнопок «НО» и «АО» производится соответственно нормальный и аварийный останов ГПА по заданному алгоритму.

В случае полного отказа системы агрегат может быть остановлен нажатием кнопки «ЭО». После полной остановки агрегата и стравливания контура (состояние кранов – предпусковое без газа) команда «ЭО» деблокируется повторным нажатием кнопки «ЭО» (кнопка «ЭО» отжата) и снятием питания с блока экстренного останова, после чего команды «ЭО» с кранов будут сняты.

Посредством пультовой рабочей станции с загруженным операторским интерфейсом «Аргус 5000» осуществляются контроль, управление и изменение режимов работы ГПА. При этом режимы работы ГПА выводятся как на дисплей рабочей станции, в зону обобщенной сигнализации, так и на панель резервного управления.

При работе с системой используются понятия режимов и под-режимов работы ГПА.

Режимом называется состояние ГПА, обусловленное степенью готовности ГПА к пуску или проверкой работоспособности его под-систем, или подключением ГПА к работе на внутреннюю (пуск на кольцо) или внешнюю (выход в магистраль) нагрузку, или работой ГПА на эту нагрузку, или отключением ГПА от нагрузки и остановом. Текущий режим ГПА отражается в окне «Обобщенной сигнализации» Аргус.

Подрежимом называется этап формирования режима, связанный с управлением определенной технологической подсистемой ГПА.

Например, режим «Пуск на кольцо» последовательно использует подрежимы «Пуск маслосистемы», «Заполнение контура», «Запуск двигателя» и «Прогрев».

Если какой-либо ИМ не выполняет поданной на него команды (например, не открылся кран), система, выждав контрольное время, выдает предупредительный сигнал о неотработке. Если отработка этого ИМ необходима для решения технологической задачи, система останавливает выполнение подрежима и ждет пока ИМ не перейдет в нужное состояние. Это делается либо повтором команды из ДУ (если это предусмотрено), либо вручную. Если же неотработка команды этим исполнительным механизмом в течение контрольного времени приводит к аварийной ситуации, система выполняет аварийный останов.

Кроме того, подрежимы задают доступный оператору набор кнопок в панели «Управление».

Режимы ГПА делятся на несколько групп:

- режимы на остановленном агрегате;
- проверочные режимы;
- режимы пуска;
- режимы работы;
- режимы останова.

Режимы на остановленном агрегате

Режимы на остановленном ГПА служат для изменения степени готовности ГПА к запуску.

На остановленном ГПА возможны 3 режима:

- ГПА неисправен (ГПА не может быть запущен до устранения неисправности);
- холодный резерв (ГПА будет готов к пуску при достижении необходимой температуры в отсеках и маслобаках);
- горячий резерв (ГПА готов к пуску).

Переходы из состояния в состояние производятся при наличии соответствующих условий, нажатием кнопок в панели «Управление».

Для определения возможных состояний ГПА существуют группы условий:

- отсутствие активных режимов (в данный момент агрегат не работает, не пускается, не останавливается и не работает в режиме проверки (см. ниже);
- предпусковое положение ИМ;
- условия горячего резерва;
- газ в нагнетателе.

Условие отсутствия активных режимов является необходимым для формирования любого режима на остановленном ГПА.

Условие предпускового положения ИМ является необходимым для формирования режимов «Холодный резерв» и «Горячий резерв». В случае неправильного положения каких-либо ИМ выводится соответствующее сообщение в панель «Управление». Для перехода в «Холодный резерв» или «Горячий резерв» ИМы необходимо перевести в предпусковое положение вручную.

Условие горячего резерва является необходимым для формирования режима «Горячий резерв». В случае невыполнения каких-либо условий горячего резерва выводится сообщение в панель «Управление».

Режим «ГПА неисправен»

Содержит два подрежима:

- «Ремонт» (возникает после аварийного останова со стравливанием контура Н или после нажатия кнопки «Ремонт»);
- «Неправильное положение ИМ» (возникает при несоответствии положения ИМ и отсутствию подрежима «Ремонт»).

При предпусковом положении ИМ возможен переход из этого режима в режим «Хол. резерв» кнопкой «Хол.рез», а если есть еще и условия горячего резерва, то и в «Горячий резерв» кнопкой «Гор.рез» в панели «Управление».

Режим «Холодный резерв»

Устанавливается на остановленном ГПА при предпусковом положении кранов, после нормального останова или при включении системы, или при нажатии кнопки «Хол.рез» на режимах «ГПА неисправен» и «Горячий резерв». Невозможен с газом в нагнетателе. Переход из этого режима возможен в режим «ГПА неисправен» нажатием кнопки «Ремонт» и в режим «Горячий резерв» – нажатием кнопки при наличии условий горячего резерва. Если условий горячего резерва нет, то при нажатии кнопки «Гор.рез» взводится триггер контроля температуры в маслобаках (о чем выводится технологиче-

ское сообщение – Регулирование температуры в маслобаках) и система включением и выключением электронагревателей в маслобаках поддерживает в них предпусковую температуру. Горячий резерв в этом случае установится автоматически при достижении необходимых условий.

Режим «Горячий резерв»

Устанавливается на остановленном ГПА при наличии предпускового положения ИМ и условий горячего резерва после нажатия кнопки «Гор.рез».

Горячий резерв может быть с газом в нагнетателе. Возможен переход из этого режима в режим «ГПА неисправен» нажатием кнопки «Ремонт» и в режим «Холодный резерв» – нажатием кнопки «Хол.рез» (при отсутствии газа в контуре).

Только в режиме горячий резерв можно выбрать режим пуска ГПА и только из него можно запуститься. Для этого необходимо выбрать в панели «Управление» режим запуска агрегата. При этом необходимо учитывать, что при наличии газа в контуре нагнетателя запрещена ХП.

Чтобы отменить выбор режима, надо нажать кнопку «Отмена», а чтобы вернуться в режим «Холодный резерв» – кнопку «Хол. рез» при отсутствии газа в нагнетателе.

Проверочные режимы и подрежимы (РПР)

Проверочные РПР служат для проверки подсистем ГПА перед пуском.

Возможны следующие РПР:

- подрежим «Проверка защит»;
- режим «Проверка защит по маслу» (ПЗМ);
- режим «Комплексная проверка кранов» (КПК);
- режим «Холодная прокрутка» (ХП).

Подрежим «Проверка защит»

Проверку защит можно проводить только при отсутствии газа в контуре нагнетателя. Для запуска подрежима необходимо в режиме «Холодный резерв» выбрать в панели «Управление» кнопку «Проверка защит». Установится подрежим «Проверка защит». Проверка аварийных защит производится в соответствии с приложением Е. После завершения подрежима и нажатия кнопки «Отмена» подрежим снимается. Перечень аварийных защит приведен в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Режим «Проверка защит маслосистемы»

Режим «Проверка защит маслосистемы» (ПЗМ) можно проводить только при отсутствии газа в контуре нагнетателя.

Для запуска ПЗМ необходимо в режиме «Горячий резерв» выбрать в панели «Управление» кнопку «ПЗМ». Если установился подрежим «Готов к ПЗМ», нажать там же кнопку «Пуск». Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

После снижения давления маслосмазки нагнетателя и перепада масло–газ ниже аварийных уставок должны появиться аварийные сообщения «Низкое Рмсм Н» и «Низкий dРм-г». Если оба сообщения появились, надо нажать кнопку «Деблокировка». При этом защиты снимаются, аварийные сообщения деблокируются, а режим заканчивается, переходя в режим «Горячий резерв».

Если сообщения не появились спустя 10 с после снижения давлений ниже аварийных уставок, выйти из режима можно нажатием кнопки «Отмена». Пуск на рабочие режимы запрещается до устранения неисправностей.

Режим «Холодная прокрутка» (ХП)

ХП предназначена для предпусковой проверки всех систем двигателя, кроме системы зажигания, а также систем маслосмазки и уплотнения нагнетателя. ХП можно проводить только при отсутствии газа в контуре нагнетателя. Алгоритм формирования режима описан в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Режим «Комплексная проверка кранов»

Для запуска режима КПК необходимо в режиме «Горячий резерв» выбрать в панели «Управление» кнопку «КПК». Если установился подрежим «Готов к КПК», нажать там же кнопку «Пуск». Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Пусковые режимы

В системе предусмотрены два пусковых режима – «Пуск на Кольцо» и «Пуск в Магистраль», предназначенных для запуска ГПА соответственно на режимы «Работа на Кольцо» и «Работа в Магистраль».

Режим «Пуск на кольцо»

В панели «Управление» нажать кнопку «Кольцо». Если установился подрежим «Готов к пуску на Кольцо», нажать там же кнопку «Пуск».

Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

ВНИМАНИЕ: *На режимах прогрев и выше, когда пусковые насосы должны быть отключены, при недостаточном давлении масла смазки (менее 0,12 МПа) или уплотнения (менее 0,12 МПа) насосы включатся. В панели «управление» появятся сообщения «неисправность контура ГНС (ГНУ)» и насосы будут находиться в работе до тех пор, пока оператор их не отключит. Если давление стабилизировалось и превышает 0,18 МПа (давление смазки нагнетателя) или 0,18 МПа (давление уплотнения) при оборотах 4100, насос следует отключить.*

Соответствующее сообщение в этом случае снимается при подаче команды на отключение насоса с первого листа мнемосхемы.

Режим «Пуск в магистраль»

В панели «Управление» нажать кнопку «Магистраль». Если установился подрежим «Готов к пуску в Магистраль», нажать там же кнопку «Пуск».

Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Режимы работы

В системе предусмотрены два режима работы («Работа на кольцо» и «Работа в Магистраль»). На режиме «Кольцо» два подрежима: «Выход в Магистраль» и «Испытание АПР». На режиме «Магистраль» один подрежим – «Переход на Кольцо».

Переход из режима «Магистраль» в режим «Кольцо»

Переход агрегата на «Кольцо» осуществляется с режима «Магистраль» после нажатия кнопки «Кольцо» в панели «Управление». При этом отключено дистанционное управление краном бр (анти-помпажный клапан – АПК) и осуществляется автоматический переход из магистрали на кольцо.

Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Переход из режима «Кольцо» в режим «Магистраль»

Переход в данный режим осуществляется из режима «Кольцо» нажатием кнопки «Магистраль» из панели «Управление». При этом включено автоматическое управление краном бр (технологическое сообщение «ТС Авт.управление краном бр») и осуществляется алгоритм автоматической загрузки агрегата в «Магистраль».

Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Режимы останова

Режим «Нормальный останов»

Режим «Нормальный останов» устанавливается при нажатии в панели «Управление» кнопки «НО».

Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Режим «Аварийный останов со стравливанием газа»

Режим «Аварийный останов со стравливанием газа» устанавливается при нажатии в панели «Управление» Аргус кнопки «АО со стравл.» или при нажатии кнопки «АО» на ПРУ, по аварийным сигналам, вызывающим аварийный останов со стравливанием газа (перечень сигналов приведен в документе СС.421457.01-11-04 Д50). Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Режим «Аварийный останов без стравливания газа»

Режим «Аварийный останов без стравливания газа» устанавливается при нажатии в панели «Управление» Аргус кнопки «АО без стравл.» или по аварийным сигналам, вызывающим аварийный останов без стравливания газа (перечень сигналов приведен в документе СС.421457.01-11-04 Д50).

После нажатия кнопки «Деблокировка» устанавливается режим «ГПА неисправен» и подрежим «Горячий резерв с газом».

Действия системы на данном режиме отражены в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Режим «Вынужденный нормальный останов»

Вынужденный нормальный останов производится по аварийным сигналам, приведенным в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления». Настоящий режим выполняется по программе НО.

В зависимости от сигналов, которые разбиты на две группы, выполняется:

- вынужденный аварийный останов со стравливанием (ВНОсс);
- вынужденный аварийный останов без стравливания (ВНОбс). Дальнейший порядок действий производится в соответствии с алгоритмом, приведенным в документе СС.421457.01-11-04 Д50 «Алгоритмы управления».

Режимы и подрежимы по окончании соответствуют режимам указанных выше типов АО:

- при стравливании газа устанавливается режим «ГПА неисправен» и подрежим «Ремонт»;
- при нестравливании газа устанавливается режим «ГПА неисправен» и подрежим «Горячий резерв с газом».

Дистанционное управление исполнительными механизмами

Включение режима дистанционного управления исполнительными механизмами приводит к отключению автоматического управления (например, ТЭНы, жалюзи, задвижка ПОС и т.д).

Дистанционное управление кранами в алгоритме допускается на режиме «КПК» и на остановленном агрегате.

Дистанционное управление пусковыми насосами (ПНУ и ПНС) допускается при отсутствии режима аварийного останова и включенных ВОТ, отключение ПНУ и ПНС блокируется сообщением «Газ в нагнетателе». Отключение ПНС блокируется включенным ПНУ.

9.5 Организация человеко-машинного интерфейса системы

Организация человеко-машинного интерфейса должна обеспечивать наиболее полное и удобное представление информации о параметрах работы ГПА и осуществление операций управления работой его систем и узлов.

Представление информации (в том числе и архивной) на экране рабочей станции осуществляется с помощью пультовой программы «Аргус 5000», которая является многоабонентной системой, т.е. может отображать и обслуживать несколько абонентов. Под абонентом в Аргус понимается объект управления, в данном случае – газоперекачивающий агрегат.

Аргус обеспечивает представление информации следующих видов:

- текущие значения аналоговых параметров; состояние исполнительных механизмов (ИМ);
- список активных в данный момент аварийных, ограничительных и предупредительных сообщений (сигнализационные сообщения);

- сообщения о текущих режимах работы ГПА и об изменениях режимов (режимные сообщения);
- сообщения о неисправностях аппаратуры системы (диагностические сообщения);
- сообщения о ходе процесса регулирования (технологические сообщения): ретроспектива значений аналоговых параметров, переключений ИМ, появления, квитирования и снятия сигнализационных и режимных сообщений, сообщений о неисправностях в аппаратуре системы, протокол управляющих действий оператора.

Представление информации осуществляется в текстово-числовом и графическом (графики и мнемосхемы) виде.

Основными элементами интерфейса Аргус являются:

- окно обобщенной сигнализации – отображает текущий режим работы технологического объекта и информацию о наличии сигнализационных сообщений;
- окно сигнализации – отображает список аварийных, ограничительных и предупредительных сообщений. В это же окно помимо сообщений об отклонениях параметров, упорядоченных по времени их появления, выводится информация о неисправности аппаратуры автоматики в виде обобщенных сигналов диагностики системы;
- окно групп аналоговых параметров – отображает данные о текущих значениях аналоговых параметров;
- окно дискретных параметров – отображает данные о текущих значениях входных дискретных параметров;
- окно настраиваемых параметров – отображает данные о текущих значениях настраиваемых параметров и позволяет изменять значения настраиваемых параметров;
- окно мнемосхемы – отображает данные о состоянии исполнительных механизмов и предоставляет возможность отдавать команды управления для передачи в систему;
- окно журнала событий – отображает ретроспективу появления, квитирования и снятия сигнализационных сообщений, режимные сообщения, сообщения об изменении состояния ИМ, сообщения о командах оператора, сообщения об изменении значений настраиваемых параметров, сообщения о неисправностях в аппаратуре системы. Кроме того, окно журнала событий предоставляет возможность

просмотра архивов, сформированных при записи ретроспективы какого-либо технологического процесса;

- окно диагностики – отображает данные о неисправностях в аппаратуре системы;
- окно графика отдельного аналогового параметра – отображает ретроспективу значений одного аналогового параметра;
- окно группового графика – отображает ретроспективу значений нескольких аналоговых и дискретных параметров;
- окно архивов – предоставляет возможность просмотра и печати архивов технологических процессов.

Наиболее существенные изменения информации, связанные с нарушением или изменением режима, имеют звуковое сопровождение.

Вид терминала Аргус представлен на рис. 9.2

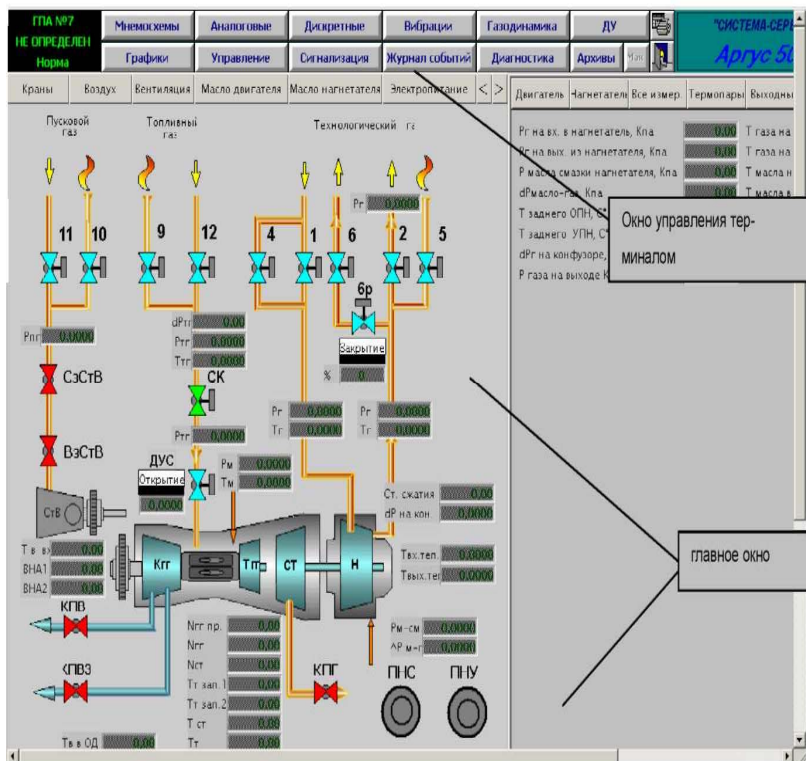


Рис. 9.2. Внешний вид терминала Аргус

Главное окно Аргус состоит из трех частей. Первая часть (расположена слева от центра) – это пространство терминала, предназначено для размещения окна мнемосхем и окна группового графика. Вторая часть (расположена справа от центра) – это пространство терминала, предназначено для размещения окна групп аналоговых параметров, дискретных параметров, вибраций, окна управления и окна газодинамических характеристик. Третья часть (расположена снизу от центра) – это пространство терминала, предназначено для размещения окна сигнализации, окна журнала событий, окна дискретных архивов по событию и окна дистанционного управления исполнительными механизмами по двигателю.

Окна терминала

Окна терминала Аргус можно разделить на две группы. К первой группе относятся окна, содержащие текстовую информацию, ко второй – окна, содержащие графическую информацию. В первую группу входят окно групп аналоговых параметров, окно дискретных параметров, окно вибраций, окно сигнализации, окно журнала событий, окно диагностики системы, окно управления. Ко второй группе относятся окно группового графика и окно мнемосхем.

Окно управления терминалом (рис.9.2). Окно обобщенной сигнализации (рис.9.3).

Окно обобщенной сигнализации всегда располагается в верхней части экрана, его невозможно закрыть, свернуть, задвинуть за край экрана или перекрыть другими окнами.



Рис. 9.3. Окно обобщенной сигнализации

Первая (верхняя) строка неизменяема, в ней указано название абонента. Во второй строке отображается название текущего режима абонента (например, «Горячий резерв», «Холодная прокрутка» и

т.д.). Третья строка – статус сигнализации по данному абоненту. В ней может быть отображено одно из следующих сообщений: «обрыв» – рабочая станция не имеет связи с системой; «авария» – по абоненту есть хотя бы одно аварийное сообщение, связь с системой нормальная; «ограничение» – по абоненту есть хотя бы одно ограничительное сообщение, аварийных сообщений нет, связь с системой нормальная; «предупреждение» – по абоненту есть хотя бы одно предупредительное сообщение, аварийных и ограничительных сообщений нет, связь с системой нормальная; «норма» – нет сигнализационных сообщений, связь с системой нормальная. Сообщение **«норма»** выводится зеленым цветом. Сообщение **«пожар»** и **«авария»** – красным. Сообщение **«ограничение»** – лиловым, а прочие сообщения – желтым.

Сообщения **«обрыв»** выводятся с миганием, окна терминала при таком статусе обобщенной сигнализации не обновляются, а отображают последнюю полученную от системы достоверную информацию.

Статус сигнализации выводится на черном или на светло-сером фоне. Нормальный цвет фона – черный. Если приходит новое сигнализационное сообщение, фон третьей строки, зоны обобщенной сигнализации, меняется на серый цвет. Он остается серым до тех пор, пока оператор не заквитирует новые сообщения в окне сигнализации терминала.

При возникновении обрыва связи с системой фон третьей строки также становится серым. Для того чтобы заквитировать обрыв, необходимо один раз нажать правую кнопку мыши в зоне обобщенной сигнализации.

Кнопки управления терминалом

Кнопки предназначены для вывода окон Аргус в соответствующей области терминала. На рисунке показаны эти кнопки.

Кнопка «Мнемосхемы» – при нажатии этой кнопки откроется окно мнемосхем в первой части главного окна терминала;

Кнопка «Управление» – откроется окно управления агрегатом во второй части главного окна терминала;

Кнопка «Газодинамика» – откроется окно газодинамических характеристик во второй части главного окна терминала;

Кнопка «Аналоговые» – откроется окно групп аналоговых параметров во второй части главного окна терминала;

Кнопка «Дискретные» – откроется окно дискретных параметров во второй части главного окна терминала;

Кнопка «Вибрации» – откроется окно вибраций по двигателю и нагнетателю во второй части главного окна терминала;

Кнопка «Графики» – откроется окно групповых графиков в первой части главного окна терминала;

Кнопка «ДУ» – откроется окно дистанционного управления исполнительными механизмами по двигателю (управление ДУСом, ВНА1,2, стендовой, воздушной заслонками, КПВ, КПВЗ, КПГ, стопорным клапаном) в третьей части главного окна терминала (кнопку может нажать только администратор);

Кнопка «Сигнализация» – откроется окно сигнализации в третьей части главного окна терминала;

Кнопка «Архивы» – откроется окно дискретных и аналоговых архивов по событию в третьей части главного окна терминала;


Кнопка «Журнал событий» – откроется окно журнала событий в третьей части главного окна терминала;


Кнопка «Диагностика» – откроется окно диагностики системы в третьей части главного окна терминала.

Окно групп аналоговых параметров

Используя кнопки в этом окне, можно просмотреть текущие значения всех аналоговых параметров, обрабатываемых системой. Вид окна групп аналоговых параметров показан на рис. 9.4.

Для вызова окна групп аналоговых параметров необходимо нажать кнопку «Аналоговые» левой клавишей мыши.

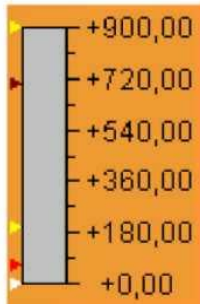
Основной способ отображения аналогового параметра – в виде прямоугольника с числовым значением внутри. Пример: I^{0254} . При неисправности измерительного канала (например, при обрыве датчика или отказе коммутатора) вместо значения параметра индицируется многоточие. 

Если значение параметра выходит за диапазон измерения, то вместо числового значения индицируется стрелка влево – при «зашкале» вниз или стрелка вправо – при «зашкале» вверх. 

Двигатель	Нагнетатель	Все измер.	Термопары	Выходные	Регулировки	Настройки	АПР	Расч
			Ртг перед СК, Кпа	0,00	Ттг перед ДУС, С°		0,00	
			Р масла суфлирования, Кпа	0,00	Т воздуха на входе ГТУ, С°		0,00	
			Ртг перед засл. СтВ, Кпа	0,00	Т масла в МБД, С°		0,00	
			Рг на вх. в нагнетатель, Кпа	0,00	Т масла на входе в Д., С°		0,00	
			Рг на вых. из нагнетателя, Кпа	0,00	Т масла опоры РП ТВД, С°		0,00	
			Полное Рвозд. за КВД, Кпа	0,00	Т масла опоры ШП КВД, С°		0,00	
			Ртг перед ДУСом, Кпа	0,00	Т масла подшипников СТ, С°		0,00	
			Р масла на входе Д, Кпа	0,00	Т масла на выходе АВОМ Д, С°		0,00	
			Ртг перед измер. диафр., Кпа	0,00	Т возд в отсеке ПТ, С°		0,00	
			Рвозд. в разг. полости СТ, Кпа	0,00	Т возд в камере ВОУ, С°		0,00	
			Рвозд. в разг. полости КВД, Кпа	0,00	Т возд в отсеке СА, С°		0,00	
			Полное Рг за турбиной ГГ, Кпа	0,00	Т возд в отсеке Д, С°		0,00	
			Р масла смазки нагнетателя, Кпа	0,00	Т возд в отсеке МА, С°		0,00	
			Р атмосферного воздуха, Кпа	0,00	Т наружного воздуха, С°		0,00	
			Р газа на выходе КЦ, Кпа	0,00	Т воды на входе ТО, С°		0,00	
			dРг на конфузоре, Кпа	0,00	Т воды на выходе ТО, С°		0,00	
			dРтг на измер. диафр., Кпа	0,00	Т газа на входе в Н, С°		0,00	
			dРвозд. на вх. Д, Кпа	0,00	Т газа на выходе из Н, С°		0,00	
			dРгаза за СТ, Кпа	0,00	Т заднего ОПН, С°		0,00	
			dРвозд. стат. на вх. в Д, Кпа	0,00	Т переднего ОПН, С°		0,00	
			dРмасло-газ, Кпа	0,00	Т заднего УПН, С°		0,00	
			dРфильтрах топ. г, Кпа	0,00	Т масла в МБН, С°		0,00	
			dРвозд. атм./воздуховод ОТ, Кпа	0,00	Т масла на входе в Н, С°		0,00	
			Разрежение в камере ВОУ, Кпа	0,00	Т масла на входе в АВОМ Н, С°		0,00	
				0,00	Т масла на выходе из АВОМ Н, С°		0,00	
			Ттг на запуске (1), С°	0,00	Ттг перед измер. диафр., С°		0,00	
			Ттг на запуске (2), С°	0,00	Т воздуха в отсеке Н, С°		0,00	
			Т холодного спая, С°	0,00	Температура в ББ, С°		0,00	
			Ттг т.1, С°	0,00	Контроль ~220, В		0,00	
			Ттг т.2, С°	0,00	Контроль =220, В		0,00	

Рис. 9.4. Окно групп аналоговых параметров

Помимо числового представления аналогового параметра на экране может отображаться столбчатый индикатор, показывающий соотношение текущего значения параметра с аварийными, ограничительными и предупредительными уставками (если они есть) и со всем диапазоном измерения.



Уставки отображаются соответственно красными, лиловыми и желтыми рисками. Как текст значения параметра, так и индикатор закрашиваются красным цветом, если значение параметра находится в аварийной зоне, лиловым – в ограничительной зоне, желтым – в предупредительной зоне, в остальных случаях для вывода используется зеленый цвет.

Отображение аварийных, ограничительных и предупредительных сообщений в окне сигнализации и закраска текстов значений и индикаторов в окне аналоговых параметров выполняются независимо друг от друга. Окно «Сигнализация» получает информацию от алгоритма управления, а индикаторы в окне аналоговых параметров закрашиваются автономно – по результатам сравнения текущих значений с уставками из базы данных SCADA системы WinCC.

Для каждого аналогового параметра можно вывести меню с дополнительными функциями. Для этого на аналоговом параметре нужно нажать правую кнопку мыши. Меню позволяет вывести измерительный канал в ремонт, добавить в групповой график (добавление произойдет, если в первой части главного окна терминала открыто окно «Текущие графики»), и также открыть индивидуальный график для этого параметра.

Следует помнить, что алгоритм управления пользуется данными, представленными в окне сигнализации.

Окно сигнализации

В окно сигнализации выводится список аварийных, ограничительных и предупредительных сообщений, упорядоченных по времени их появления. Вид окна показан на рис. 9.5.

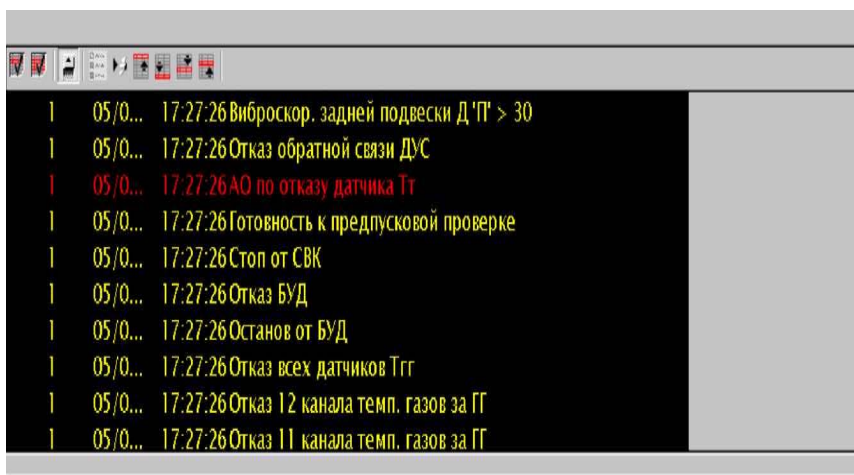


Рис. 9.5. Окно сигнализации

Аварийные сообщения выводятся красными буквами, ограничительные сообщения – лиловыми, предупреждения – желтыми. Не квитированные сообщения выводятся на черном фоне, квитированные – на сером.

Наличие неквитированных сообщений сопровождается звуковой сигнализацией (различной для аварийных, ограничительных и предупредительных сообщений).

Чтобы квитировать сообщение, надо левой кнопкой мыши выделить это сообщение и нажать кнопку, находящуюся в левом верхнем углу окна сигнализации. Когда будет заквитировано последнее не квитированное сообщение, серый фон в статусе обобщенной сигнализации сменится черным и отключится звуковая сигнализация.

Окно журнала событий

В журнал событий заносится вся дискретная информация по абоненту, доступная программе. В первый столбец выводится дата, во второй – время, в третий – наименование изменившегося состояния дискретного сигнала или поданной оператором команды, либо наименование и значение измененного настраиваемого аналогового параметра, а в последний – тип события («пришло», «снялось», «нажата кнопка»). Журнал событий хранит 10000 событий с вытеснением самого старого. Вид окна журнала событий показан на рис. 9.6.


...	Дата	Время	Текст сообщения	Статус
969	15/1...	19:36:59	АО по команде оператора	Снялось
970	15/1...	19:36:59	Высокий переф. фликт. газа	Снялось
971	15/1...	19:36:59	Обратная раскрутка СТ	Снялось
972	15/1...	19:36:59	АО со стр. газа	Снялось
973	15/1...	19:37:00	ГПА неисправен	Пришло
974	15/1...	19:37:00	Деблокировка ВНА-1 ЭПА-1М	Пришло
975	15/1...	19:37:00	Деблокировка ВНА-2 ЭПА-1М	Пришло
976	15/1...	19:37:00	РЕМОНТ	Пришло
977	15/1...	19:37:00	Был Аонг	Снялось
978	15/1...	19:37:00	Разрешение ДУ крана 12	Пришло

Рис. 9.6. Окно журнала событий

Аварии пишутся красным цветом. Ограничения – лиловым цветом, а предупреждения и предпусковые условия – желтым. Технологические сообщения – темно-голубым, сигналы контроля системы – желтым или темно-красным, сигналы исполнительных механизмов (в том числе информация из мнемосхемы) – зеленым. Режимные сигналы – темно-синим, сообщения о командах оператора – белым. Сообщения об изменении значений настраиваемых аналоговых параметров – синим, а прочие сообщения – черным цветом.

Для быстрого перехода в начало или конец журнала можно воспользоваться кнопками «вверх» «в н и з» в окне журнала событий.

В связи с тем, что новые сообщения приходят в самый конец окна, то после открытия этого окна нужно нажать кнопку в панели управления окном. Эта кнопка включает или отключает возможность прокрутки журнала событий.

С помощью кнопки событий  можно распечатать последние 1000 сообщений журнала.

Окно диагностики системы

Это окно предназначено для представления информации об отказах и неисправностях в аппаратуре системы. Вид окна диагностики системы показан на рис. 9.7.

Информация, которая содержится в этом окне, адресована персоналу службы КИП. Каждому сообщению, выводимому в это окно, соответствует обобщенное сообщение в окне сигнализации. Поэтому при возникновении неисправности появляется предупреждение со всеми присущими ему атрибутами – звуковой сигнализацией и се-

рым фоном в обобщенной сигнализации. Оператор должен квити-ровать сообщение в окне сигнализации, а затем, увидев, что это обобщенный сигнал диагностики системы, посмотреть в окне диагностики системы расшифровку неисправности и при необходимости привлечь службу КИП к ее устранению.

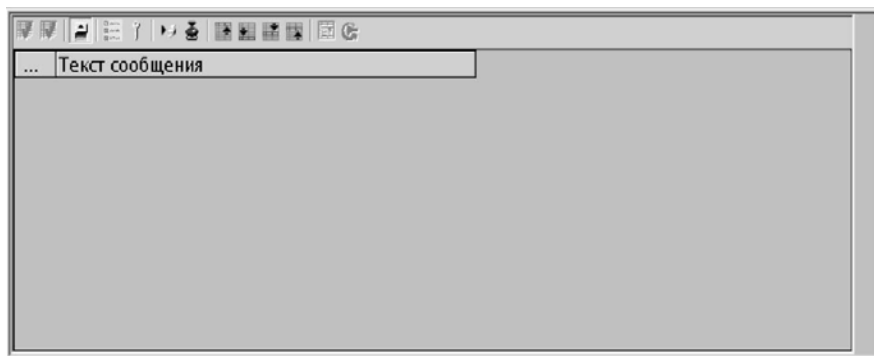


Рис. 9.7. Окно диагностики системы

Определены следующие обобщенные сигналы диагностики системы:

- «Обрыв аналогового датчика»;
- «Неисправность БПС»;
- «Обрыв цепи ИМ»;
- «Неисправность контроллера»;
- «Неисправность дискретного входа»;
- «Неисправность МСКУ» (к этой категории относятся все сигналы диагностики системы, которые нельзя отнести ни к одной из пяти первых категорий).

Эти сообщения выводятся в виде предупреждения в окно сигнализации.

Окно группового графика

Это окно предназначено для просмотра нескольких графиков (не более тринадцати) на одном поле. Окно группового графика представлено на рис. 9.8.

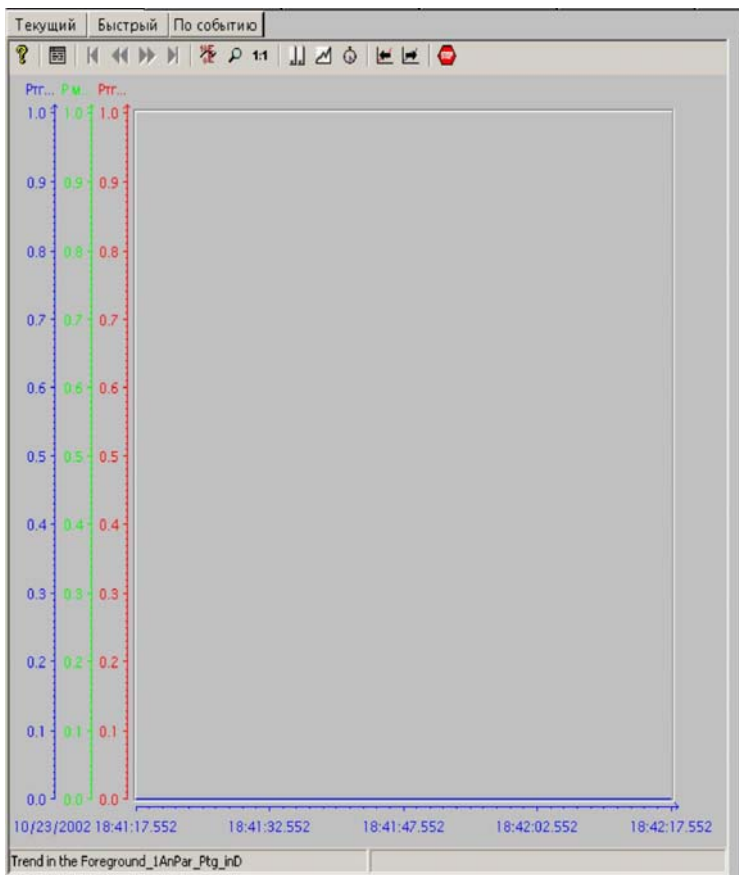


Рис. 9.8. Окно группового графика

С помощью кнопок можно вывести соответствующие графики, а именно: при нажатии кнопки «Текущий» выведется окно графиков для текущих значений, в которое добавляются графики из окна аналоговых параметров по правой кнопке на параметре. При нажатии кнопки «Быстрый» откроется окно с уже добавленными графиками 16 параметров, частота записи в архив равняется 50ms. 16 параметров – это:

- Обороты ГГ, об/мин.
- Обороты СТ, об/мин.
- Тг за турбиной ГГ на запуске (1 точка), С°.

- Контур регулирования.
- Давление воздуха за КВД, расч.
- Давление воздуха за КВД, изм.
- Задание на ДУС, %.
- Положение ДУСа, %.
- Задание на ВНА1, град.
- Положение ВНА1, град.
- Задание на ВНА2, град.
- Положение ВНА2, град.
- Команда на открытие СК (дискретный сигнал).
- Команда на открытие КПВ (дискретный сигнал).
- Команда на открытие КПВЗ, КПП (дискретный сигнал).
- Давление топливного газа перед ДУСом, кПа.

Ниже показано дополнительное окно группового графика, называемое журналом группового графика. Данное окно появляется автоматически при вызове в меню вкладки группового графика (табл.9.4).


Таблица 9.4 Журнал группового графика

Trend (направление)	Tag Connection (подключение функций)	Value (значение)	Date/Time (Дата/время)
Trend 1	_Current_u1 AnPar Ppg_inZsVS	0.333433 i.	'2002 3:13:40.41
Trend 2	_Current_u1 √ 1AnPar VbrP0D	3.346e+001 i.	'2002 3:13:40.41
Trend 3	_Current_u1 √ 1AnPar T_GG_1	1.435e+001 i.	'2002 3:13:40.41
Trend 4			

В журнал группового графика выводится информация по аналоговым параметрам, выведенным в окно группового графика, а именно:

- порядковый номер графика в окне;
- название аналогового параметра;
- величина аналогового параметра;
- текущее время аналогового параметра.

Каждый аналоговый параметр в окне группового графика и журнале группового графика отображается своим цветом.

Существуют также часовые, суточные архивы и архивы по событию. Для того чтобы их просмотреть, необходимо открыть окно графиков. В панели инструментов текущего графика нужно нажать кнопку , после чего появится диалоговое окно, с помощью которого можно вывести любой аналоговый параметр из этих архивов.

Окно группового графика содержит линейку инструментов с набором кнопок, показанных на рис. 9.9.

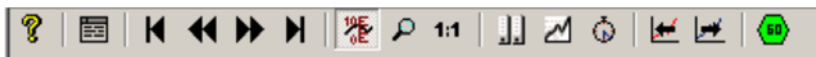




Рис. 9.9. Линейка инструментов группового графика

Назначение кнопок, выведенных в линейку управления, описано ниже.

 «Интерактивная справочная система» – производит вызов интерактивной справки.

 Данная кнопка выбирает диалоговое окно для графиков и таблиц. Параметры, введенные в системе конфигурирования, служат в качестве базовых установок. Диалоговое окно выглядит так, как это представлено на рис. 9.10.

Для того чтобы добавить аналоговый параметр, нужно кнопкой «+» добавить тренд или сразу добавить несколько трендов (кнопкой «-» можно удалять эти тренды). Затем нужно выделить один из трендов и нажать кнопку «Selection». Выведется окно, в котором можно выбрать по алгоритмическому имени аналоговый параметр из необходимого архива. Имена архивов:

- `_Current_u1` – архив текущих значений (длительность 20 мин, частота записи 1с);
- `_Hours_u1` – часовой архив значений (длительность 1 ч, частота записи 2с);
- `-_Days_u1` – дневной архив значений (длительность 24 ч, частота записи 2с);
- `-Pusk_Archive` – архив горячих запусков (архив начинает записываться в момент начала запуска и прекращает запись в момент выхода агрегата на КОЛЬЦО, предыстория равняется 20 мин, частота записи 1 с);

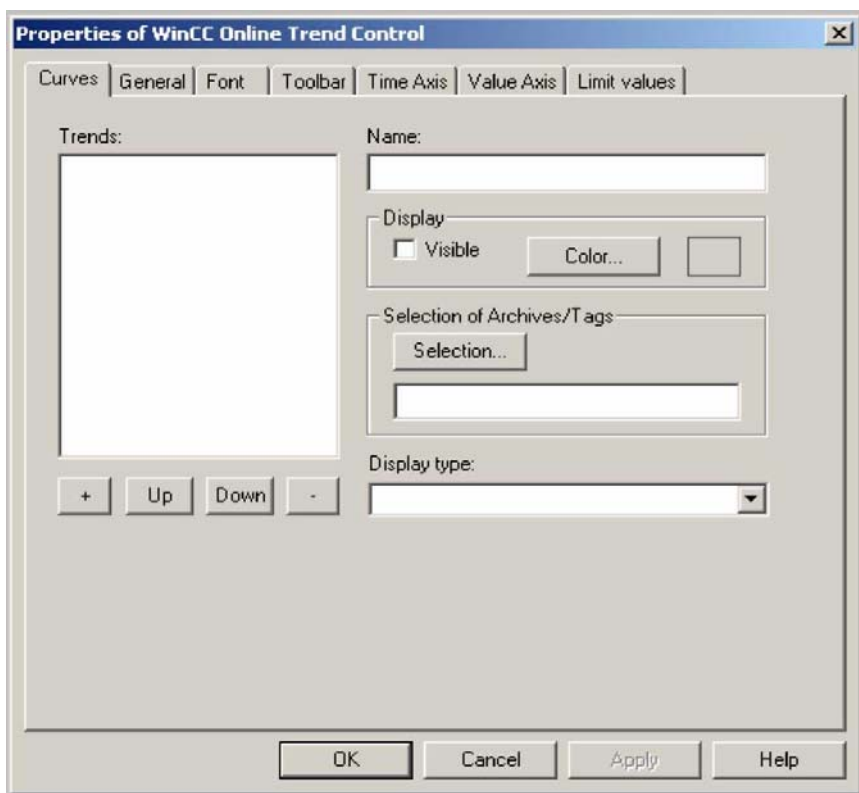


Рис. 9.10. Диалоговое окно графиков и таблиц








- AO_Archive – архив аварийных остановов (архив начинает записываться в момент аварийного останова с предысторией в 20 мин и прекращает запись после выхода из аварийного режима, частота записи 1с);
- HP_Archive – архив холодных прокруток (архив начинает записываться в момент запуска режима «Холодная прокрутка» и прекращает запись после выхода из режима «Холодная прокрутка»).

В каждом из этих архивов находится список одинаковых параметров, которые и нужно выбирать.






Таким образом, можно добавить до 15 параметров. После того, как добавили необходимое количество трендов и привязали их к соответствующим архивам, во вкладке Value Axis можно указать диа-

пазон оси Y и написать комментарий для этой оси. Для того чтобы каждый параметр имел свою ось Y, во вкладке General нужно убрать галку в поле Common Y-Axis. После нажать кнопку ОК. Соответственно, если выставить галку в этом поле, то ось Y станет единой для всех параметров.

Одно условие для вывода графиков – чтобы параметры выбирались из одного и того же архива, тогда значения архивов будут достоверными.

-  «Первая запись данных/Временной интервал». Если отображение было приостановлено, эта кнопка позволяет произвести отображение значений архивированного параметра.
-  – «Предыдущая запись данных/Временной интервал». Если отображение было приостановлено, эта кнопка позволяет произвести отображение значений архивированного тега.
-  – «Следующая запись данных/Временной интервал». Если отображение было приостановлено, эта кнопка позволяет произвести отображение значений архивированного тега.
-  – «Последняя запись данных/Временной интервал». Если отображение было приостановлено, эта кнопка позволяет произвести отображение значений архивированного тега.
-  – «Отображение значения в данной позиции». После активирования кнопки в окне группового графика будет отображена вертикальная линия – линейка. Под окном группового графика кроме имени архива и имени параметра будут отображены координаты X и Y измеренного значения. Другие измеренные значения можно определить путем установки указателя мыши на линейке и перемещения его с одновременным удержанием левой кнопки мыши нажатой, и так – до требуемой позиции.
-  – «Зона увеличения». Функция масштабирования позволяет увеличить любой сегмент окна тренда.
-  – «Возврат к исходному виду». По этой кнопке происходит возврат к нормальному конфигурированному

отображению из режима увеличенного отображения тренда.

-  – «Диалоговое окно выбора архив и тега». Данная кнопка открывает диалоговое окно выбора архивов и тестов.
-  – «Диалоговое окно для выбора трендов». Данная кнопка открывает диалоговое окно для превращения трендов в видимые или невидимые.
-  – «Выбор временного диапазона». Данная кнопка открывает диалоговое окно, предназначенное для установки временного диапазона, отображенного в окне тренда.
-  – «Запуск/приостановка обновления». Приостанавливает вывод обновленного отображения. Значения сохраняются в буфере и вводятся повторно после активирования данной кнопки снова.
-  – «Запуск/приостановка обновления». Продолжает отображение.

Примечание: При приостановке отображения можно осуществлять только прокрутку изображения. Запись в архив продолжается в фоновом режиме.

Окно мнемосхемы

Мнемосхема представляет собой альбом картинок-листов. Вид окна мнемосхем представлен на рис. 9.11.

С помощью кнопок, которые находятся в самом верху окна, можно открывать разные мнемосхемы. А с помощью кнопок «> <>» можно перелистывать их назад и вперед по порядку.

Исполнительные механизмы (ИМ) на мнемосхеме отображаются в виде графических объектов, изменяющих свой цвет, положение и т.д. в зависимости от состояния соответствующих ИМ. Аналоговые параметры на мнемосхемах отображаются в цифровом виде либо в виде столбчатых (вертикальных или горизонтальных) индикаторов.

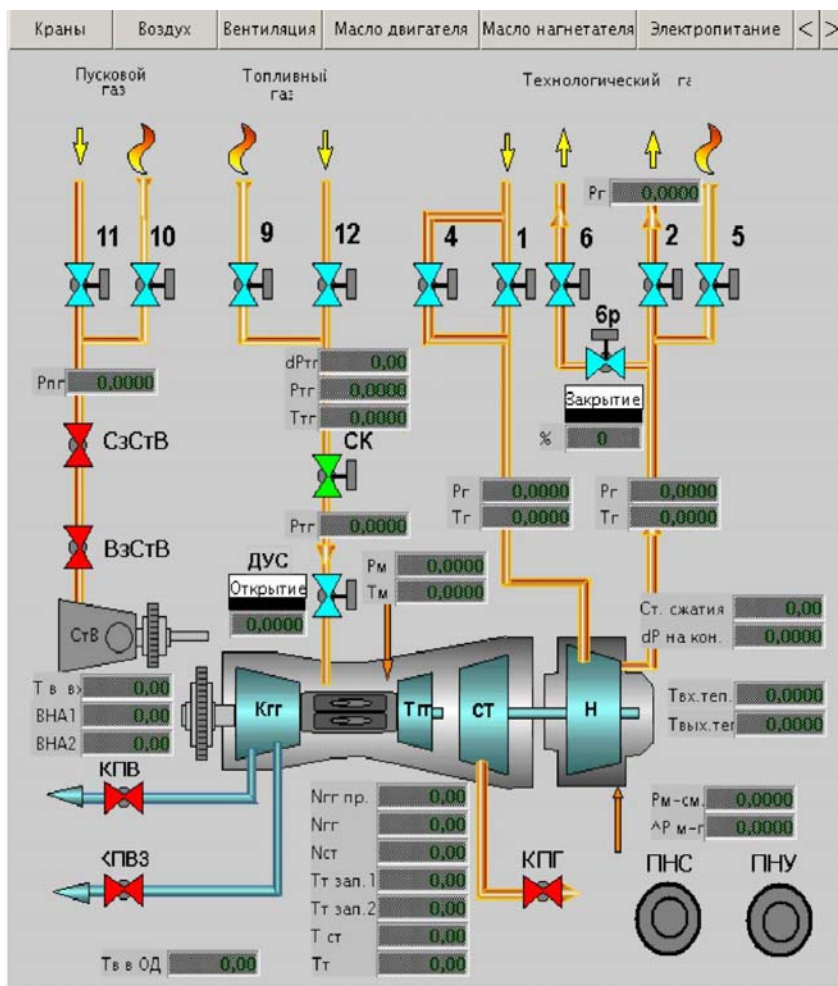


Рис. 9.11. Окно мнемосхем

Из мнемосхемы можно осуществлять дистанционное управление ИМ.

Если разрешено дистанционное управление конкретным ИМ, то при установке на него курсора мыши курсор принимает форму обычной стрелки мыши, над которой находится «молния» зеленого света. Щелчок на таком объекте левой кнопкой мыши вызывает появление блока диалога для управления этим ИМ.

Окно управления

Окно управления предназначено для выдачи команд управления в систему и отображения необходимой оператору предупредительной информации. Вид окна управления показан на рис. 9.12.



Рис. 9.12. Окно управления

В окно управления выведены кнопки управления системой:

- Деблокировка.
- АО со стравл.
- АО без стравл.
- НО.
- Ремонт.
- Холодный резерв.
- Горячий резерв.
- ХП.
- КПК.
- Кольцо.
- Магистраль.
- Пуск.
- ПЗМ.
- ПЗ.
- Тест.
- Отмена.
- Тест БЗА.
- РЧВ вверх.

- РЧВ вниз.
- Макс. режим включить.
- Макс. режим выключить.

Темным цветом подсвечиваются «активные» кнопки (доступные для управления) на данном режиме работы ГПА. Недоступные для управления кнопки – «неактивные» на данном режиме работы ГПА, не подсвечиваются.

Панель режимных сообщений системы расположена в самом верху окна управления и предназначена для отображения текущего режима работы ГПА. Режимы работы ГПА отображаются в панели синим цветом.

В части окна, расположенной ниже панели режимных сообщений, предусмотрена панель сигнализационных сообщений, в которой отображаются активные в данный момент неисправности технологического оборудования, предупредительные сообщения о невыполнении логических условий (неоткрытие заслонок, самопроизвольная перестановка кранов) и обобщенные предупредительные сигналы.

Также в окне управления выведены таймеры: запуска, охлаждения двигателя и нагнетателя, заполнения контура, холодной прокрутки и прогрева на минимальном режиме.

Все режимные кнопки при нажатии сопровождаются подтверждением. То есть после нажатия кнопки нужно подтвердить это действие.



Печать в Аргус

В Аргус существует печать: окон, групповых графиков, журнала событий, протокола аварийных защит текущих аналоговых параметров. Для того чтобы распечатать окна в Аргус, нужно в главном окне терминала нажать соответствующие кнопки. Они выглядят так



Левая кнопка печатает левое окно. Средняя кнопка печатает правое окно, а правое окно печатает нижнее окно. Если навести мышкой на этот объект, то появится надпись о том, какое действие выполняет данная кнопка.

Чтобы распечатать групповой график, нужно открыть окно группового графика, добавить в него необходимые параметры и нажать кнопку печати, которая находится в окне управления терминалом. На кнопке нарисован знак принтера.

Газодинамика ДУ		  	Система
Диагностик Button7	Архивы	ВЫХОД	Аргус

Печать журнала событий, печать протокола аварийных защит и печать текущих аналоговых параметров производится с помощью кнопок:

Печать ПАЗ |

Печать ЖС за сут. |


|Тек. знач. Ан. пар.

Вход в Аргус

Под входом в Аргус подразумевается то, что после полной загрузки Аргус 5000 необходимо нажать клавишу F11 на клавиатуре, после чего выведется окно, в которое необходимо ввести имя пользователя и пароль. Это позволит дополнительно открыть некоторые окна, если вы вошли под пользователем, который имеет нужные полномочия, или не открыть, не изменить или случайно не выйти из Аргус.

Выход из Аргус

Для выхода из Аргус нужно войти под пользователем, имеющим соответствующие полномочия. Для ввода пользователя нужно нажать клавишу F11 на клавиатуре компьютера и ввести имя пользователя и пароль в открывшееся окно. После этого необходимо нажать кнопку в окне управления терминалом «Выход из Аргус

5000»  .

Описание экранных форм, мнемосхем системы

Общие сведения

Мнемосхема абонента представляет собой альбом листов (видеокадров), на каждом из которых отображается участок технологической схемы или схематичное изображение технологического объекта (узла, блока, установки). Исполнительные механизмы (ИМ) на мнемосхеме отображаются в виде графических объектов, изменяющих свой цвет, положение и т.д. в зависимости от состояния соответствующих ИМ. Аналоговые параметры на мнемосхемах отобража-

ются либо в цифровом виде, либо в виде столбчатых (вертикальных или горизонтальных) индикаторов.

Виды отображаемой информации на мнемосхемах системы

Вся отображаемая информация на мнемосхемах состоит из трех групп элементов мнемосхем:

- динамические элементы;
- статические элементы;
- цифровые элементы.

Динамические элементы мнемосхем

Динамическими элементами мнемосхем называются объекты мнемосхем, меняющие свой вид в зависимости от состояния отображаемого объекта.

К динамическим элементам мнемосхем относятся: краны, задвижки, насосы, вентиляторы, заслонки и др.

Цвета динамических элементов мнемосхем для запорной арматуры, как правило, обозначают следующие положения исполнительных механизмов:

- красный цвет – исполнительный механизм в положении «закрыт»;
- зеленый цвет – исполнительный механизм в положении «открыт»;
- голубой цвет – сигнализирует о промежуточном положении исполнительного механизма, т.е. нет сигналов от конечных выключателей закрытого и открытого положения;
- черный цвет – сигнализирует о неисправности исполнительного механизма, т.е. одновременно присутствуют сигналы от конечных выключателей закрытого и открытого положения (и открыт, и закрыт).

Помимо самого положения исполнительных механизмов динамические элементы отображают команды управления, подаваемые на механизм. Цвета команд управления также зарезервированы и обозначают следующее:

- зеленый цвет – команда на открытие исполнительного механизма;
- красный цвет – команда на закрытие исполнительного механизма.

На мнемосхеме динамические элементы, например краны, имеют следующий вид (состояние крана обозначается на мнемосхеме цветом):



Исполнительные механизмы, имеющие аналоговое управление (например, кран бр), изображаются аналогично обычным кранам (рис.9.13). Рядом с каждым краном, имеющим аналоговое управление, расположены кнопки управления, позволяющие выдавать команду на кран в виде изменяющегося аналогового сигнала.



Рис. 9.13. Кран с аналоговым управлением

Для управления режимами работы отдельных устройств и агрегатов на мнемосхемах располагаются специальные кнопки (см. рис. 9.13, 9.14). Как правило, с их помощью производится включение и выключение режима дистанционного управления исполнительным механизмом, а также могут подаваться некоторые другие команды.



Рис. 9.14. Пиктограммы кнопок

При этом не нажатая кнопка отображается серым цветом, нажатая – зеленым. На самой кнопке может быть нанесена какая-нибудь надпись или поставлен значок. Цвет кнопки может быть изменен в зависимости от ее назначения. При нажатии левой кнопки мыши на пиктограмме кнопки выдается команда в систему. Таким образом, данная команда будет передана в программу управления и вид кнопки соответственно изменится.

Для отображения аналоговых параметров с заданными уставками, а также для индикации различных дискретных сигналов могут применяться такие элементы мнемосхем, как цветовые индикаторы («лампочки»). Их цвет меняется в зависимости от значения отображаемого параметра. Примером такого индикатора может служить элемент мнемосхемы, сигнализирующий о исправности или неисправности блока питания системы (рис. 9.15). Если индикатор имеет зеленый цвет, блок питания исправен и нормально работает.

При неисправности блока питания индикатор подсвечивается красным цветом.

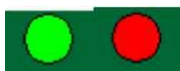


Рис. 9.15. Различные состояния цветового индикатора

Статические элементы мнемосхем

Статическими элементами мнемосхем называются элементы, постоянно видимые на мнемосхеме, не изменяющие свой цвет и положение.

К статическим элементам мнемосхем относятся: подложка мнемосхемы, неуправляемые краны и заслонки и т.п., трубопроводы обвязки ГПА и изображения элементов технологического объекта, не меняющие своего положения на мнемосхеме.

Цифровые элементы мнемосхем

Цифровые элементы мнемосхем индицируют в цифровом виде значения измеряемых и контролируемых параметров технологического объекта.

К цифровым элементам мнемосхем относятся все аналоговые параметры. Цвета статических элементов мнемосхем являются зарезервированными и обозначают следующие состояния аналогового параметра:

- зеленый цвет – аналоговый параметр в норме;
- желтый цвет – аналоговый параметр превысил предупредительную уставку;
- лиловый цвет – аналоговый параметр превысил ограничительную уставку;
- красный цвет – аналоговый параметр превысил аварийную уставку. На мнемосхеме цифровые элементы отображаются в окнах аналоговых параметров (рис. 9.16).

РтГ |3,9984

Рис. 9.16. Окно аналогового параметра

Слева от окна аналогового параметра помещено его сокращенное название. Например, название аналогового параметра: «Давление топливного газа» на мнемосхеме выглядит как РтГ.

Некоторые из аналоговых параметров являются настройками, т.е. их значения могут быть изменены оператором непосредственно в пультовой программе. Для изменения настроек антипомпажного или топливного регулирования необходимо в окне групп аналоговых параметров нажать кнопку, соответствующую группе аналоговых параметров, которые вас интересуют. И соответствующая группа откроется только тогда, когда пользователь будет иметь необходимые полномочия.

Для изменения значения необходимо подвести курсор на окно выбранного настраиваемого параметра и нажать левую кнопку мыши. Ввод настройки осуществляется с клавиатуры (рис. 9.17).

Поле ввода изменения значения настроек

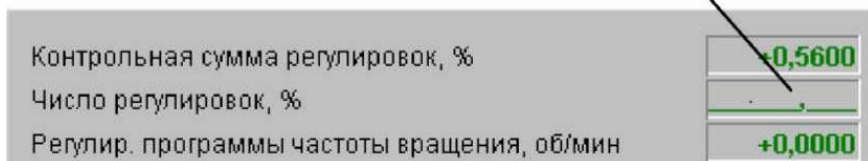


Рис. 9.17. Диалог изменения аналоговой настройки

Описания мнемосхем системы

На мнемосхемах системы, приведенных на рис. 9.18 – 9.24, изображены участки технологических схем работы ГПА, включающих трубопроводы, схематичное изображение двигателя, нагнетателя и т.д., все доступные для управления технологические объекты – краны, насосы, вентиляторы и др. Также на мнемосхему выведены окна аналоговых данных, отображающие значения контролируемых системой аналоговых параметров (частот вращения роторов ГГ и СТ ГПА, давление и температуру и индикаторы дискретных параметров (сигналы засорения фильтров, неисправностей блоков питания и т.д.) и кнопки управления.

Мнемосхема «Технологическая»

Внешний вид мнемосхемы «Технологическая» представлен на рис. 9.18. На мнемосхеме показана технологическая схема крановой обвязки ГПА, позволяющая осуществлять визуальный контроль и управление кранами.

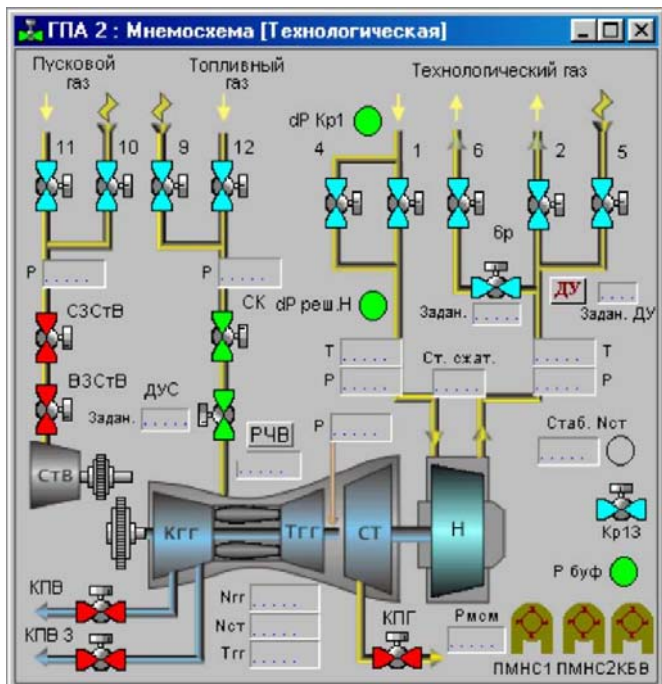


Рис. 9.18. Мнемосхема «Технологическая»

Схему условно можно разделить на следующие системы:

- система подвода пускового газа, состоящая из кранов 10 и 11, стеновой заслонки стартера воздушного (СзСтВ), воздушной заслонки стартера воздушного (ВзСтВ) и стартера;
- система подвода топливного газа, состоящая из кранов 9 и 12, стопорного клапана (СК) и дозатора топлива (ДУС);
- обвязка нагнетателя, состоящая из кранов 1, 2, 4, 5, 6 и бр.

Управляемые элементы

Управляемые элементы – исполнительные механизмы, переключатели и т.д., управление которыми возможно непосредственно с мнемосхемы.

а) Пусковой насос смазки (ПНС1, ПНС2)

Для подачи команды на включение/отключение насоса необходимо сделать следующее:

- навести курсор «мышки» на насос, при этом курсор принимает форму «стрелки с зеленой молнией»;
- щелкнуть левой клавишей «мышки», при этом появится выпадающее меню;
- в появившемся меню щелчком «мышки» выбрать необходимую команду, после чего команда будет подана.

Примечание:

- названия команд в выпадающих меню выделены темным цветом в том случае, если управление данным исполнительным механизмом не заблокировано алгоритмом управления. В том случае, если управление выбранным ИМ заблокировано алгоритмом управления, то названия команд в выпадающем меню не подсвечиваются;
- символ «стрелка с зеленой молнией» появляется только для тех ИМ, для которых предусмотрено управление с мнемосхемы.

б) Компрессор буферного воздуха (КБВ)

Управляется аналогично ПНС.

в) Краны 1, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12

Для выдачи команды на открытие/закрытие крана с мнемосхемы необходимо сделать следующее:

- навести курсор «мышки» на один из кранов, при этом курсор принимает форму «стрелки»;

- щелкнуть левой клавишей «мышки», при этом появится выпадающее меню;
- в появившемся меню щелчком «мышки» выбрать необходимую команду, при этом появится окно с запросом подтверждения на подачу команды;
- после утвердительного ответа на запрос команда будет подана, в противном случае выдача команды будет отменена.

Сигнализаторы

Сигнализаторы – неуправляемые элементы мнемосхем, отображающие состояния исполнительных механизмов, датчиков и т.д., позволяющие оператору оценить работу тех или иных систем ГПА.

Муфта воздушного стартера

Муфта схематично изображена на мнемосхеме в виде двух шестеренок, входящих в зацепление друг с другом при раскрутке турбины от стартера.

КПВ, КПВЗ, КПГ

Отображают текущее состояние клапанов. Красный цвет – клапана закрыты, зеленый цвет – клапана открыты.

Камера сгорания

При наличии горения в камере сгорания появляется изображение факела.

Аналоговые параметры

На мнемосхему выведены следующие контролируемые аналоговые параметры:

- Р пускового газа;
- Р топливного газа перед СК и перед ДУС;
- Т топливного газа;
- Р газа на входе и выходе нагнетателя;
- Т газа на входе и выходе нагнетателя;
- Р газа за краном 2;
- Р и Т масла смазки Д;
- Р масла смазки нагнетателя;
- Р масло-газ;
- Обороты ГГ и СТ;
- Т за ГГ;
- Т воды на входе в теплообменник;
- Т воды на выходе теплообменника;
- Т возд. на входе в ГТУ;

- Положение ВНА1;
- Положение ВНА2;
- Положение ДУС;
- Задание на Mokveld;
- Т за ГГ на запуске 1,2.

Мнемосхема «Воздухообеспечение двигателя»

Внешний вид мнемосхемы «Воздухообеспечение двигателя» представлен на рис. 9.19.

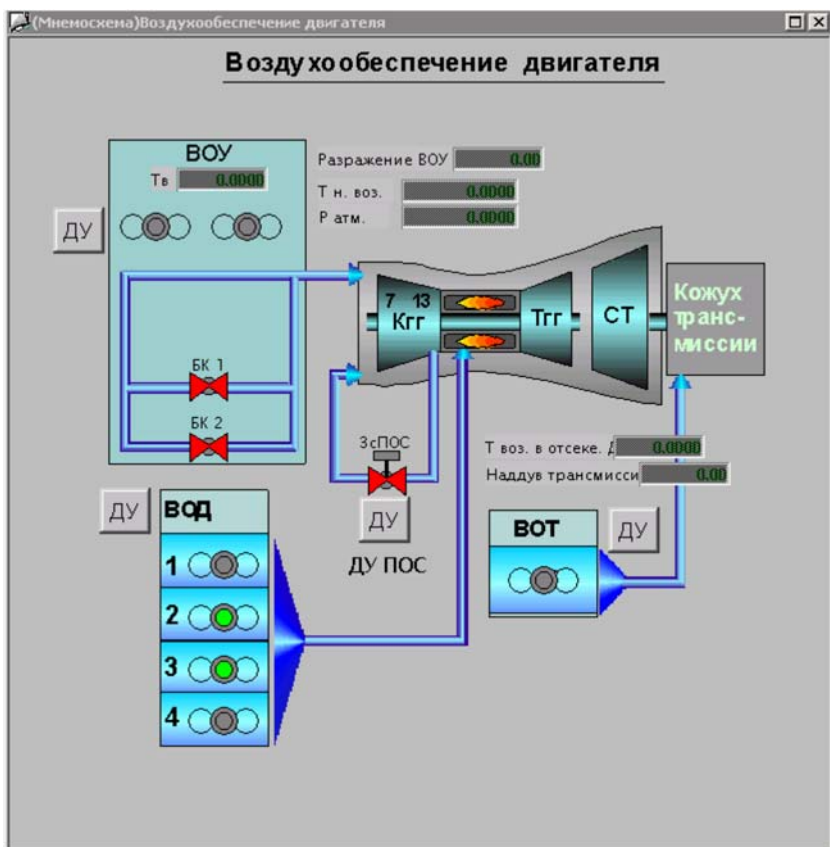


Рис. 9.19. Мнемосхема «Воздухообеспечение двигателя»

На мнемосхеме показаны следующие системы воздухообеспечения двигателя:

- система подачи циклового воздуха в камеру сгорания, включающую в себя блок фильтров, байпасные клапана и вентиляторы ВОУ;
- противообледенительная система, состоящая из трубопровода перепуска горячего воздуха (из-за высоких ступеней компрессора на входной направляющий аппарат) с заслонкой ЗсПОС;
- система обдува двигателя и трансмиссии, состоящая из четырех вентиляторов обдува двигателя (ВОД) и одного – трансмиссии (ВОТ).

Управляемые элементы

Заслонка противообледенительной системы (ЗсПОС)

Команды на открытие/закрытие заслонки могут быть поданы с мнемосхемы при нажатой кнопке ДУ (подсвечена зеленым цветом). Управление заслонкой осуществляется аналогично управлению кранами, описанному в п. «Мнемосхема «Технологическая».

Кнопка переключения дистанционного/автоматического режима управления ЗсПОС

Кнопка предназначена для включения/отключения режима дистанционного управления. Переключение осуществляется следующим образом: навести курсор «мышки» на кнопку, при этом курсор примет форму «стрелки»; щелкнуть левой клавишей «мышки», при этом кнопка подсветится зеленым цветом и режим дистанционного управления будет включен. Для отключения режима дистанционного управления необходимо повторно щелкнуть левой клавишей «мышки» на кнопке.

Вентиляторы обдува двигателя (ВОД)

Команды на включение/отключение вентиляторов могут быть поданы с мнемосхемы при нажатой кнопке ДУ (подсвечена зеленым цветом). Управление вентиляторами осуществляется аналогично управлению насосами, описанному в п. «Мнемосхема «Технологическая».

Кнопка переключения дистанционного/автоматического режима управления вентиляторами обдува двигателя

Кнопка предназначена для включения/отключения режима дистанционного управления вентиляторами обдува двигателя. Управление осуществляется аналогично кнопке ДУ ЗсПОС.

Вентиляторы обдува трансмиссии

Команды на включение/отключение вентиляторов могут быть поданы с мнемосхемы при нажатой кнопке ДУ (подсвечена зеленым цветом).

Кнопка переключения дистанционного/автоматического режима управления вентилятором обдува трансмиссии

Кнопка предназначена для включения/отключения режима дистанционного управления вентиляторами обдува трансмиссии. Управление осуществляется аналогично кнопке ДУ ЗсПОС.

Сигнализаторы

Байпасные клапана ВОУ (БК)

В нормальном состоянии клапана закрыты (подсвечены красным цветом), при засорении ВОУ клапана открываются и подсвечиваются зеленым цветом.

Вентиляторы ВОУ (ВВОУ)

Сигнализируют о работе одного или обоих вентиляторов.

Аналоговые параметры

На мнемосхему выведены следующие контролируемые аналоговые параметры:

- разрежение в камере всаса;
- Т атмосферного воздуха;
- Р атмосферного воздуха.

Мнемосхема «Схема вентиляции и контроля загазованности»

Внешний вид мнемосхемы представлен на рис. 9.20. Мнемосхема предназначена для визуального контроля и управления вентиляторами и ТЭНами отсеков ГПА.

На мнемосхеме условно изображены следующие отсеки ГПА:

- отсек двигателя;
- отсек нагнетателя;
- отсек управления; отсек маслоагрегатов.

Управляемые элементы

На мнемосхему выведены следующие управляемые элементы:

- ТЭНы отсека ГТУ (3 шт.);
- ТЭНы отсека Н (3 шт.);
- ТЭНы отсека маслоагрегатов;
- вентиляторы отсека ГТУ;
- вентиляторы отсека Н;
- вентиляторы отсека маслоагрегатов (МА).

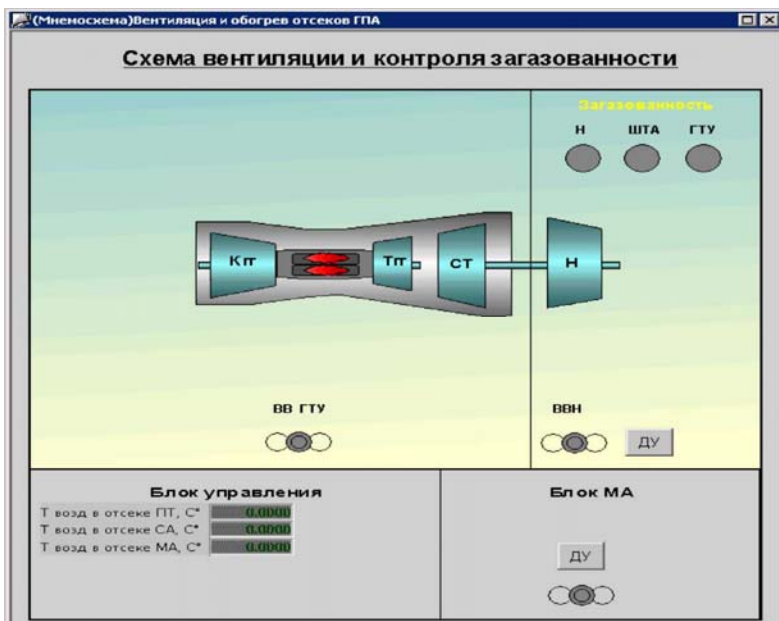


Рис. 9.20. Мнемосхема «Схема вентиляции и контроля загазованности»

Управление вентиляторами и ТЭНами осуществляется аналогично управлению насосами, описанному в п. «Мнемосхема «Технологическая»».

Сигнализаторы

На мнемосхему выведены следующие сигнализаторы:

- индикатор загазованности в отсеке Н;
- индикатор загазованности в отсеке ГТУ;
- индикатор загазованности в шкафу топливной аппаратуры (ШТА).

При наличии сигналов о повышенной загазованности в отсеках соответствующий индикатор подсвечивается желтым цветом. При наличии сигналов об аварийной загазованности в отсеках соответствующий индикатор подсвечивается красным цветом.

Аналоговые параметры

На мнемосхему выведены следующие контролируемые аналоговые параметры:

- Т воздуха в отсеке пожаротушения (ПТ);
- Т воздуха в отсеке силовой автоматики (СА);

- Т воздуха в отсеке маслоагрегатов (МА).

Мнемосхема «Маслосистема двигателя»

Внешний вид мнемосхемы представлен на рис. 9.21. Мнемосхема предназначена для визуального контроля и управления основными системами маслообеспечения ГТУ.

В систему маслообеспечения ГТУ входит следующее:

- маслобак двигателя (МБД) с установленными в нем электронагревателем и датчиками уровня и температуры масла;
- аппарат воздушного охлаждения масла (АВОМД);
- масляные фильтры с датчиками перепада давления (БМФ, БВМФ);
- сигнализаторы наличия стружки в масле.

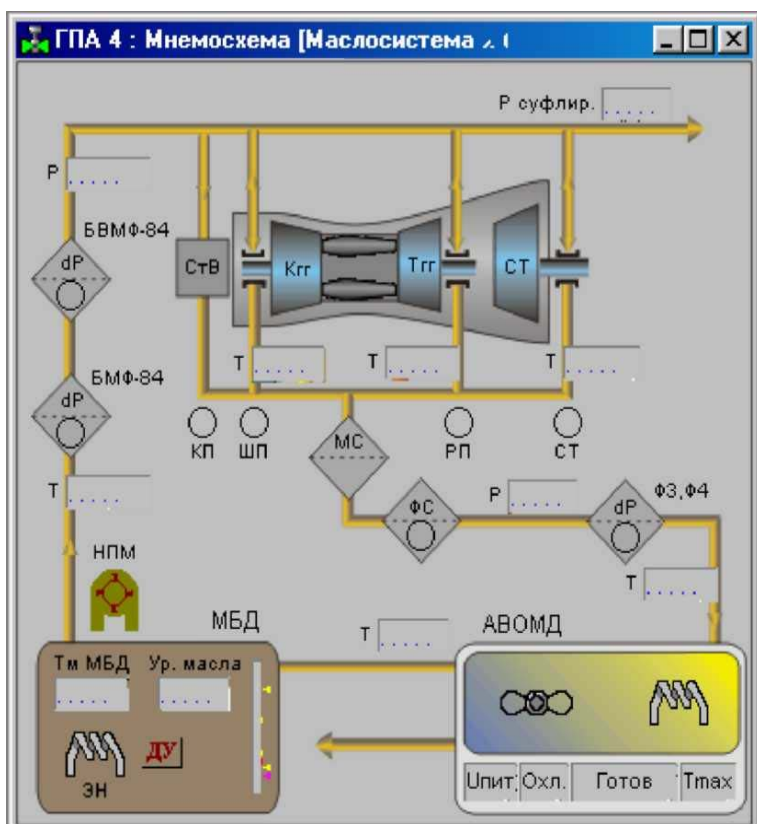


Рис. 9.21. Мнемосхема «Маслосистема двигателя»

Управляемые элементы

На мнемосхему выведены следующие управляемые элементы:

- электронагреватель маслобака двигателя (ТЭН МБД);
- кнопка переключения дистанционного/автоматического режима управления ТЭНом МБД;
- кнопка включения автоматического режима управления вентиляторами АВОМ.

Команды на включение/отключение вентиляторов и ТЭНов могут быть поданы с мнемосхемы при нажатой соответствующей кнопке ДУ (подсвечена зеленым цветом). Управление вентиляторами и ТЭНами осуществляется аналогично управлению насосами, описанному в п. «Мнемосхема «Технологическая».

Сигнализаторы

На мнемосхему выведены следующие сигнализаторы:

- перепад Р масла на блоке фильтров БВМФ;
- перепад Р масла на блоке фильтров БМФ;
- перепад Р масла на фильтрах Ф3 и Ф4;
- магнитные сигнализаторы наличия стружки в линиях откачки масла от коробки приводов (КП), стартера воздушного (СтВ), подшипника компрессора ГГ, подшипника турбины ГГ и подшипника СТ;
- фильтр-сигнализатор сетчатый (ФС).

При наличии повышенного перепада на фильтрах или стружки в сигнализаторах соответствующий индикатор подсвечивается красным цветом.

Аналоговые параметры

На мнемосхему выведены следующие контролируемые аналоговые параметры:

- Р масла смазки двигателя;
- Т масла смазки двигателя;
- Т масла в баке двигателя;
- Уровень масла в баке двигателя;
- Т масла откачки от ш/п компрессора ГГ;
- Т масла откачки от р/п турбины ГГ;
- Т масла откачки от турбины СТ;
- Р суфлирования.

Мнемосхема «Маслосистема нагнетателя»

Внешний вид мнемосхемы представлен на рис. 9.22. Мнемосхема предназначена для визуального контроля и управления основными системами маслообеспечения нагнетателя.

Система маслообеспечения нагнетателя предназначена для снабжения нагнетателя маслом высокого и низкого давления. В систему маслообеспечения входит следующее:

- маслобак нагнетателя (МБН) с установленными в нем электронагревателем и датчиками уровня и температуры масла;
- пусковой насос смазки (ПНС);
- главный насос смазки (не показан); аппарат воздушного охлаждения масла (АВОМ).

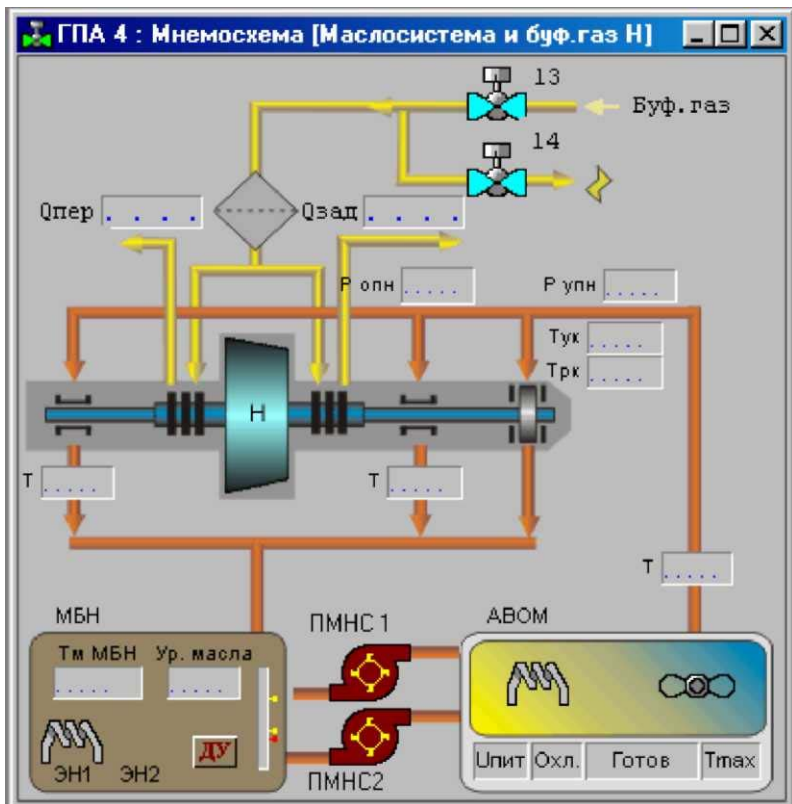


Рис. 9.22. Мнемосхема «Маслосистема нагнетателя»

Управляемые элементы

На мнемосхему выведены следующие управляемые элементы:

- пусковой насос смазки (ПНС1,2);
- ТЭН бака нагнетателя (ТЭН МБН 1,2);
- кнопка переключения дистанционного/автоматического режима управления ТЭНом МБН;
- кнопка включения автоматического режима управления вентиляторами АВОМ.

Управление насосами, вентиляторами и ТЭНами осуществляется аналогично управлению насосами, описанному в п. «Мнемосхема «Технологическая».

Команды на включение/отключение вентиляторов и ТЭНов могут быть поданы с мнемосхемы при нажатой соответствующей кнопке ДУ (подсвечена зеленым цветом).

Сигнализаторы

На мнемосхему выведены следующие сигнализаторы:

- Сигнализатор включения АВОМ Н;
- Перепад Р масла на фильтре низкого давления;
- Перепад давления масла на фильтре высокого давления.

При наличии повышенного перепада на фильтрах соответствующий индикатор подсвечивается красным цветом, сигнализируя о засорении фильтра.

Аналоговые параметры

На мнемосхему выведены следующие контролируемые аналоговые параметры:

- Т масла заднего опорного подшипника;
- Т масла переднего опорного подшипника;
- Т масла упорного подшипника;
- Перепад Р масло-газ;
- Р масла смазки;
- Т масла на входе АВОМ Н;
- Т масла на выходе АВОМ Н;
- Т масла в МБН;
- Уровень масла в МБН.

Мнемосхема «Система электропитания»

Внешний вид мнемосхемы представлен на рис. 9.23. Мнемосхема предназначена для визуального контроля питающих систему напряжений, а также контроля исправности блоков питания.

Каждый блок питания представляет из себя пару блоков питания, один из которых питается от основного напряжения $\sim 220\text{В}$, а второй от резервного $=220\text{В}$.

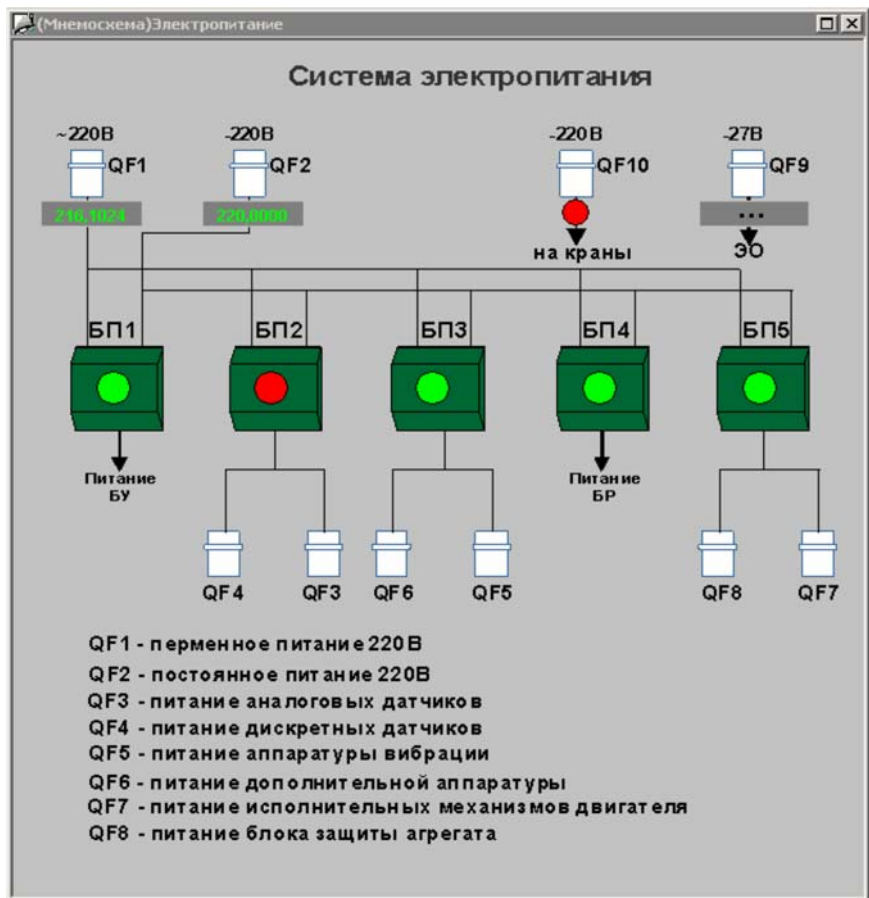


Рис. 9.23. Мнемосхема «Система электропитания»

Сигнализаторы

Сигнализаторы исправности блоков питания БП1-БП5 могут иметь следующие состояния:

- подсвечен зеленым цветом (при исправности обоих блоков питания);

- подсвечен желтым цветом (при неисправности одного из блоков питания);
- подсвечен красным цветом (при неисправности обоих блоков питания).

Сигнализатор наличия напряжения питания кранов

Индикатор подсвечивается зеленым цветом при наличии напряжения и красным – при его отсутствии.

Аналоговые параметры

На мнемосхему выведены следующие контролируемые аналоговые параметры:

- Напряжение $\sim 220\text{В}$;
- Напряжение $=220\text{В}$;
- Напряжение питания кранов;
- Напряжение $=27\text{В}$.

Мнемосхема «Утилизатор тепла»

Внешний вид мнемосхемы представлен на рис. 9.24. Мнемосхема предназначена для визуального контроля и управления основными системами утилизатора тепла.

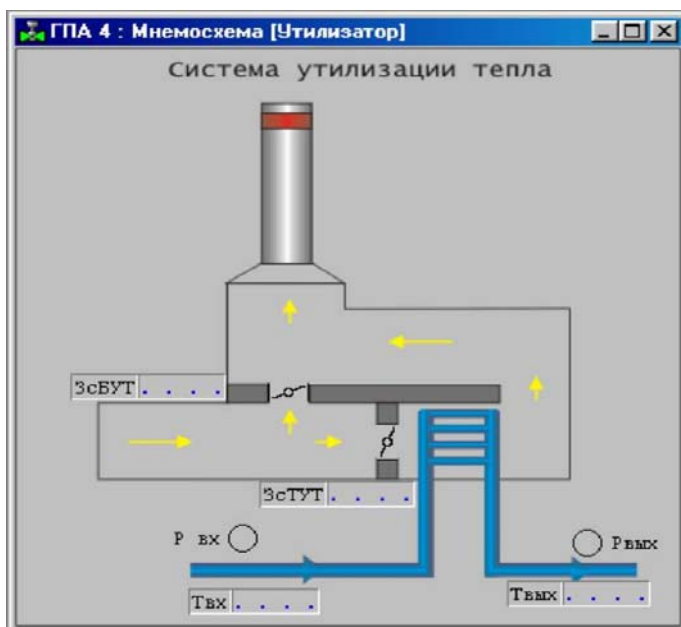


Рис. 9.24. Мнемосхема «Утилизатор тепла»

Управляемые элементы

На мнемосхему выведены следующие управляемые элементы:

- заслонка теплообменного блока УТО;
- заслонка байпасного блока УТО.

Управление заслонками осуществляется аналогично управлению насосами, описанному в п. «Мнемосхема «Технологическая».

Команды на включение/отключение заслонок могут быть поданы с мнемосхемы при нажатой соответствующей кнопке ДУ (подсвечена зеленым цветом).

Сигнализаторы

На мнемосхему выведены следующие сигнализаторы:

- Наличия давления воды на входе теплообменника;
- Наличия давления на выходе теплообменника.

Аналоговые параметры

На мнемосхему выведены следующие контролируемые аналоговые параметры:

- Т на входе утилизатора тепла;
- Т на выходе утилизатора тепла.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андриевский, Б.Р., Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB [Текст]/ Б.Р. Андриевский, А.Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 1999.
2. Востриков, А.С Теория автоматического управления. Линейные системы [Текст]: учеб. пособие / А.С. Востриков, Г.А. Французова. – Новосибирск: НГТУ, 1997.
3. Иващенко, Н.Н. Автоматическое регулирование: Теория и элементы систем [Текст] / Н.Н. Иващенко. – М.: Машиностроение, 1989.
4. Соломенцев, Ю.М. Теория автоматического регулирования [Текст]: учеб. для вузов / Ю.М. Соломенцева ; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Машиностроение, 1992.
5. Черкасов, Б.А. Автоматика и регулирование ВРД [Текст] / Б.А. Черкасов. – М.: Машиностроение, 1988.
6. Дьяконов, В.П. Simulink 5/6/7 [Текст] : самоучитель / В.П. Дьяконов – М.: LVR-Пресс, 2008.
7. Гайдук А.Р., Беляев В.Е., Пьянченко Т.А. Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в Matlab [Текст] : учеб. пособие. 4-е изд., испр. – СПб.: Издательство «Лань», 2017 – 464 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература).
8. Санчугов, В.И. Переходные и частотные характеристики типовых звеньев систем автоматического регулирования [Текст]: учеб. пособие / В.И. Санчугов, Л.В. Родионов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010.
9. Гимадиев, А.Г. Системы автоматического регулирования авиационных ГТД [Текст]: учеб.пособие/ А.Г. Гимадиев, Е.В. Шахматов, В.П. Шорин; Куйбыш.авиац.ин-т. – Куйбышев, 1990.
10. Иголкин, А.А. Исследование характеристик систем автоматического регулирования частоты вращения ГТД [Текст]: учеб. пособие / А.А. Иголкин, В.И Санчугов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2010.
11. Брюханов, В.Н. Автоматизация производства [Текст]: учебник для средн. проф. учеб. заведений / В.Н. Брюханов, А.Г. Схиртладзе, В.П. Вороненко; под ред. Ю.М. Соломенцева. – М.: Высшая школа, 2005.
12. Система комплексного управления мультипроцессорная МСКУ 5000-11-04: ЗАО «НПФ Система-Сервис», 2002.

13. Санчугов, В. И. Двигатель НК-16 [Текст] : учеб. пособие по изучению конструкции и работы двигателя / В. И. Санчугов, В. Н. Орлов. – Самара : СНЦ РАН, 2002.
14. Канунников, И.П. Газоперекачивающий агрегат ГПА-Ц-16 [Текст]: учеб. пособие / И.П. Канунников, С.Д. Стенгач, Б.А. Углов. – Самара: Изд-во СГАУ, 2011.
15. Система комплексного управления мультипроцессорная МСКУ-5000. Инструкция по работе и настройке топливного регулятора для двигателя НК-16СТ в составе газоперекачивающего агрегата СС.421457.00.И11.15 [Текст]. ЗАО «НПФ Система-Сервис». – СПб., 2008.
16. Система автоматического регулирования нагнетателя в составе МСКУ-5000. Техническое описание [Текст], ЗАО «НПФ Система-Сервис». – СПб., 2002.
17. Комплекс измерительно-вычислительный и управляющий газоперекачивающих агрегатов САУ ГПА. Руководство по эксплуатации АВЛБ 421439.001 РЭ [Текст]. ЗАО «Электронные информационные системы», 2005.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Агрегатный состав и работа систем топливопитания и автоматики авиационных ГТД

Управление работой газотурбинного двигателя (ГТД) осуществляется изменением расхода топлива. При этом в отличие от двигателя наземного применения управление авиационного ГТД должно осуществляться с учетом режимов полета самолета, широко-го изменения параметра окружающей среды (высоты и температуры воздуха), особенностей протекания рабочих процессов в двигателе и многих других факторов.

Поэтому система топливопитания современного авиационного ГТД включает в себя целый ряд автоматических устройств, помогающих экипажу самолета обеспечить эффективное и безопасное использование возможностей двигателя на различных этапах полета.

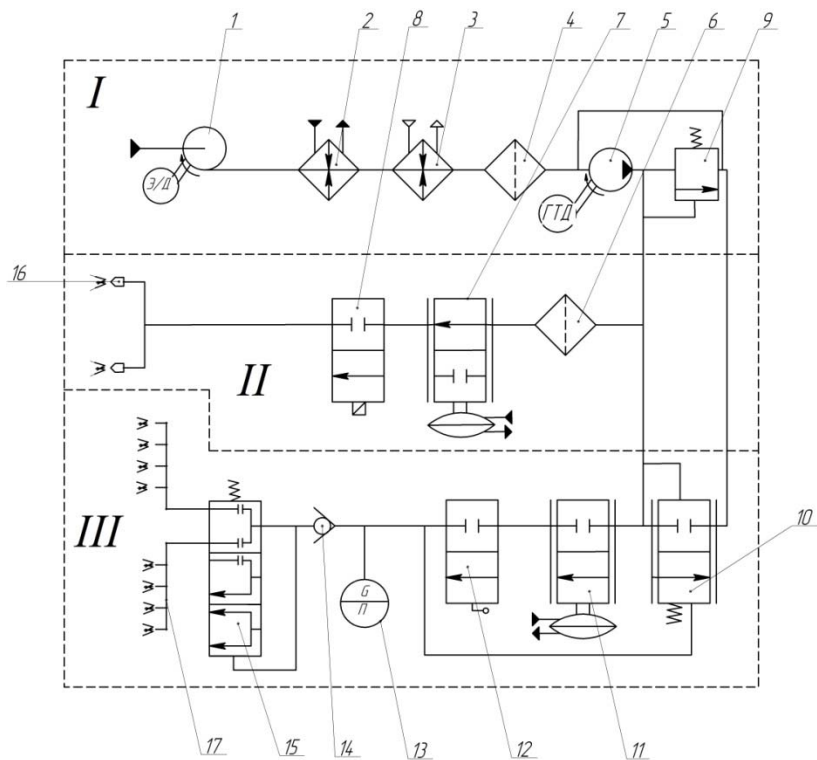


Рис. А1. Агрегатный состав системы топливопитания ГТД

Топливная система двигателя (рис. А1) состоит из трех основных частей:

- система кондиционирования топлива (I);
- система подачи топлива на запуске двигателя (II);
- система дозирования топлива на основных режимах работы двигателя (III).

Система кондиционирования топлива предназначена для придания топливу заданных физико-механических параметров. К числу этих параметров относятся:

- температура;
- степень очистки от механических загрязнений;
- заданное давление и расход.

Топливо из самолетной системы поступает на вход в центробежный подкачивающий насос 1, приводимый во вращение от автономного электродвигателя. Подкачивающий насос предназначен для преодоления топливом сопротивления агрегатов и подачи его к основному топливному насосу с избыточным давлением для бескавитационной его работы.

Подогреватели топлива 2, 3.

Несмотря на тщательную очистку топлива от присутствующей воды на пунктах ГСМ, полностью удалить воду из топлива не представляется возможным. Присутствие воды приводит к засорению (обмерзанию) топливных фильтров и выходу их из строя. Поэтому перед фильтром топливо необходимо подогревать до положительных температур. Топливо подогревают за счет отбора тепла из масляной системы двигателя (в топливо-масляном подогревателе 2), а в случае недостаточного прогрева топлива за счет горячего воздуха из-за компрессора двигателя – в топливо-воздушном подогревателе 3.

Подогретое топливо поступает к фильтру тонкой очистки топлива 4. Фильтр обеспечивает очистку топлива с тонкостью фильтрации 16 мкм. На случай засорения фильтр оснащен перепускным клапаном, который открывается при перепаде давления $0,075^{+0,01}$ МПа. При этом в кабине экипажа появляется сигнал о засорении фильтра.

Основной топливный насос 5 обеспечивает подачу топлива с давлением до 10 МПа и расходом до 12000 кг/ч. Мощность основного топливного насоса составляет несколько десятков киловатт. Поэтому топливный насос приводится во вращение от ротора ГТД через систему шестерен отбора мощности. В том случае, если в ка-

честве насоса используется шестеренчатый насос нерегулируемой подачи, в конструкции насоса предусматривается предохранительный клапан 9.

Далее топливо поступает на вход системы подачи топлива на запуске двигателя и на основных рабочих режимах.

Система дозирования подачи топлива на запуске двигателя (II) состоит из следующих агрегатов:

- дополнительного фильтра тонкой очистки топлива 6;
- дозирующего устройства системы запуска 7 с гидромеханическим приводом;
- перекрывного топливного крана 8;
- топливных форсунок системы запуска 16.

Дозирование расхода поступающего на запуске топлива осуществляется путем изменения площади проходного сечения автомата запуска 7 по команде гидромеханического привода либо по местной временной программе, а на современных двигателях – по внутривдвигательным параметрам (частоте вращения ротора, скорости изменения частоты dn/dt , от степени сжатия воздуха в компрессоре P_k^*/P_H и других).

Изменение расхода топлива на рабочих режимах работы двигателя осуществляется основной топливной системой (III).

Топливо от насоса поступает к основному дозирующему устройству 11 с гидромеханическим приводом. Поскольку основным устройством в системе топливопитания ГТД является дозирующее устройство с гидромеханическим приводом, рассмотрим его работу более подробно.

Гидромеханический привод изменяет площадь проходного сечения топлива, являясь исполнительным механизмом агрегатов и узлов системы автоматического управления двигателем. Он связан (рис. А2):

- с регулятором работы вращения ротора и осуществляет выполнение команд экипажа по изменению режимов работы двигателя от малого газа до взлетного режима;
- системой корректировки расхода топлива при приемистости и сброса газа с учетом высоты полета самолета;
- системой корректировки расхода топлива при изменении давления и температуры воздуха на входе в двигатель (P_H^* , T_H^*);

- электронной системой управления двигателем (ЭСУД) для ограничения предельно допустимой частоты вращения ротора двигателя и температуры газов на входе в турбину;
- ограничителем максимальной степени сжатия вентилятора.

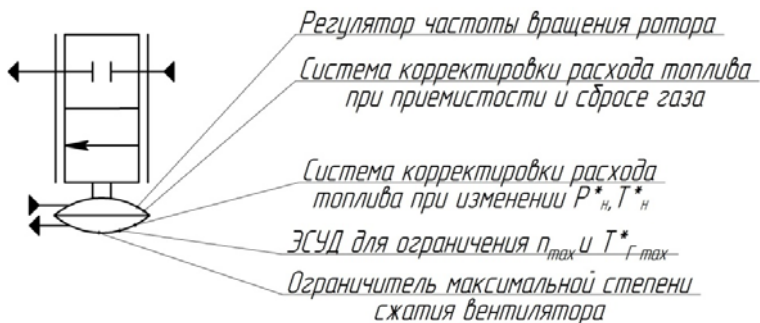


Рис. А2. Схема взаимодействия дозирующего устройства с агрегатами и узлами системы автоматического управления двигателя

Дозирующее устройство работает за счет изменения площади проходного сечения. При этом расход топлива изменяется в соответствии со следующей зависимостью:

$$G_{Т.д.у.} = \mu \cdot F_{д.у.} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{нас} - P_{\phi})}{\rho}}, \quad (A1)$$

где μ – коэффициент расхода, определяемый геометрией проточной части дозирующего устройства;

$F_{д.у.}$ – площадь проходного сечения;

$P_{нас}$ – давление, развиваемое насосом;

P_{ϕ} – давление топлива перед форсунками двигателя;

ρ – плотность топлива.

Формула (A1) показывает, что расход топлива, поступающего к форсункам, определяется площадью проходного сечения дозирующего устройства и перепадом давления ($P_{нас} - P_{\phi}$). Этот перепад зависит от переменных величин давления за насосом и перед форсунками. Для того, чтобы исключить неоднозначность расхода топлива, в системе предусмотрено специальное устройство (см. рис. А1) – клапан постоянного перепада давления топлива 10 на дозирующем

устройстве. Этот клапан воспринимает давление топлива за насосом $P_{\text{нас}}$ и давление на выходе дозирующего устройства (давление перед форсунками). При изменении разности этих давлений клапан 10 изменяет перепуск части топлива с выхода насоса на его вход. При этом расход топлива через дозирующее устройство пропорционален площади проходного сечения, а если эта площадь не изменяется, то обеспечивает постоянное значение расхода топлива при любых отклонениях давлений $P_{\text{нас}}$ и $P_{\text{ф}}$. Тем самым обеспечивается точное дозирование расхода топлива на всех рабочих режимах работы двигателя.

Перекрывной (пожарный) кран 12 совместно с краном 8 обеспечивает выключение двигателя.

Расходомер 13 поступающего в ГТД топлива позволяет определить значение мгновенного расхода топлива, являющегося одним из важнейших диагностических параметров оценки технического состояния двигателя. Кроме того, с помощью расходомера определяется суммарное количество топлива, поступившего в двигатель за время полета, и определяется остаток топлива на борту летательного аппарата. В качестве расходомеров используются турбинные датчики расхода.

Распределитель топлива по контурам рабочих форсунок 15 является двухканальным трехпозиционным распределителем. Необходимость такого агрегата в топливной системе объясняется следующим: расход топлива при изменении режимов от малого газа до взлетного увеличивается в 10 раз и более. Такое изменение потребного расхода обеспечивается увеличением перепада давления на форсунках в соответствии с формулой:

$$G_T = \mu \cdot F_{\text{ф}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{\text{ф}} - P_{\text{КС}})}{\rho}}, \quad (\text{A2})$$

где μ – коэффициент расхода, определяемый геометрией проточной части форсунок;

$F_{\text{ф}}$ – площадь проходного сечения форсунок;

$P_{\text{ф}}$ – давление топлива перед форсунками двигателя;

$P_{\text{КС}}$ – давление в камере сгорания двигателя;

ρ – плотность топлива.

Формула (A2) показывает, что для десятикратного увеличения расхода топлива давление передачи необходимо увеличивать не

меньше чем в сотню раз. Для снижения давления топлива на выходе из насоса современные ГТД оснащают двумя контурами форсунок. При этом на малых режимах работы топливо поступает в двигатель через форсунки 1-го контура, а затем через форсунки 1-го и 2-го контуров. Благодаря этому расход топлива в двигатель обеспечивается при значительно меньшем давлении. Графически работа распределителя топлива по контурам топливных форсунок иллюстрируется на рис. А3.

Пунктирными линиями на рисунке представлены расходные характеристики 1-го и 2-го контуров форсунок, а сплошной линией – расход топлива, поступающего в двигатель по двум контурам одновременно.

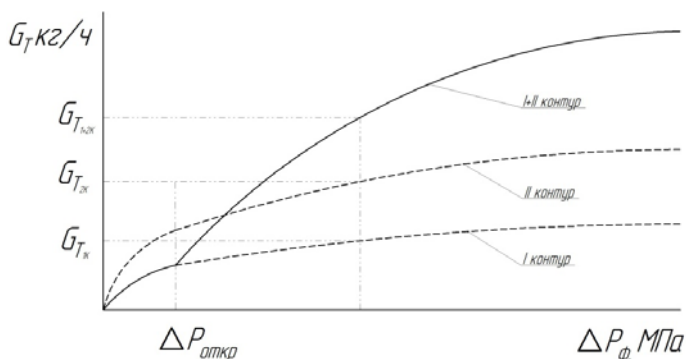


Рис. А3. Работа распределителя топлива по контурам топливных форсунок

На малых режимах работы топливо поступает в двигатель через форсунки 1-го контура. При достижении перепада давления ($\Delta P_{откр}$) топливо начинает дополнительно поступать и через форсунки 2-го контура. При этом расход топлива равен сумме расходов по контурам ($G_{TK1} + G_{TK2}$) и обеспечивается при значительно меньшем давлении топлива.

Особенности систем топливопитания ГТД с плунжерным топливным насосом

Система топливопитания с плунжерным насосом основана на том, что производительность плунжерного насоса зависит не только

от частоты вращения (δn) привода, но и от наклона опорной шайбы, определяющей ход плунжеров (δh).

$$\delta G_T = K_1 \cdot \delta n + K_2 \cdot \delta h,$$

где K_1 и K_2 – коэффициенты усиления.

Поэтому основные функции системы регулирования двигателя:

- изменение расхода топлива для поддержания частоты вращения компрессора высокого давления $n_{вд}$;
- контроль частоты вращения компрессора низкого давления $n_{нд}$;
- ограничение температуры газов перед турбиной T_{Tmax}^* ;
- коррекция расхода топлива при изменении давления p_n и температуры T_n наружного воздуха;
- обеспечение оптимального расхода топлива при приемистости и сбросе газа;
- ограничение расхода топлива по давлению воздуха за компрессором P_B^* осуществляется путем изменения угла наклона опорной шайбы плунжеров (рис.А4).

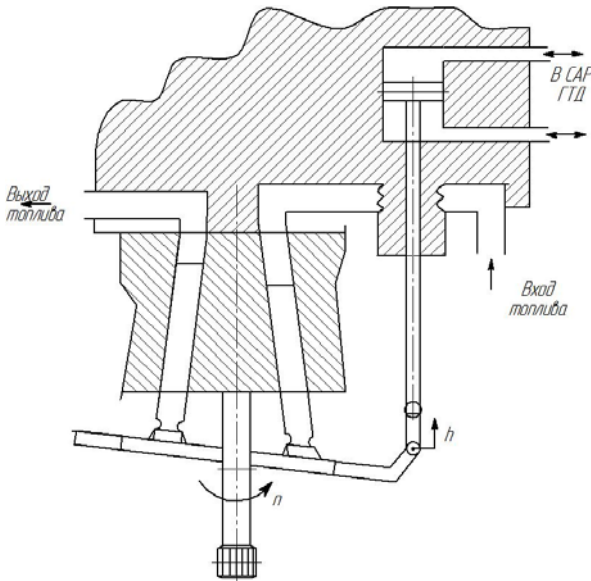


Рис. А4. Фрагмент конструкции плунжерного топливного насоса с механизмом регулирования расхода топлива

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Расшифровка кодов аналоговых расчетных параметров «Метка контура регулятора» и «Состояние регулятора»

Метки контуров регулятора:

0 – Разомкнутое управление

1 – Управление по $nВД$

2 – Управление по $nСТ$

3 – Нижнее ограничение $nНД$

4 – Нижнее ограничение $nВД$

5 – Нижнее ограничение $nСТ$

6 – Верхнее ограничение $nНД$

7 – Верхнее ограничение $nВД$

8 – Верхнее ограничение $nСТ$

9 – Верхнее ограничение T за турбиной

11 – Верхнее ограничение по расходу топливного газа

12 – Нижнее ограничение по расходу топливного газа

13 – Ограничение по скорости роста расхода топливного газа

14 – Ограничение по скорости снижения расхода топливного газа

Состояния регулятора:

1 – Резерв

2 – Пуск

3 – Работа

4 – Стоп

В режиме пуска подрежимы запуска отражаются следующим изменением состояния регулятора:

11 – розжиг

21 – разгон по программе

31 – разгон по $nВД$

41 – прогрев на холостом ходу

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Перечень сообщений, передаваемых в ПК «Аргус» от регулятора

Наименование	Статус
Розжиг	Фаза технологического процесса
Разгон по программе	Фаза технологического процесса
Разгон по N КВД	Фаза технологического процесса
Прогрев на малом газу	Фаза технологического процесса
Малый газ	Фаза технологического процесса
Холостой ход	Фаза технологического процесса
Есть горение	Фаза технологического процесса
Регулирование по N КВД	Фаза технологического процесса
Регулирование по N СТ	Фаза технологического процесса
ДУ дозатором	Предупреждение
ДУ расходом топлива	Предупреждение
Нижнее ограничение по N КНД	Предупреждение
Нижнее ограничение по N КВД	Предупреждение
Нижнее ограничение по N ТН	Предупреждение
Верхнее ограничение по N КНД	Предупреждение
Верхнее ограничение по N КВД	Предупреждение
Верхнее ограничение по N ТН	Предупреждение
Верхнее ограничение по Т газа за ТНД	Предупреждение
Верхнее ограничение по Р воздуха за КВД	Предупреждение
Двигатель на верхнем ограничении	Фаза технологического процесса
Двигатель на нижнем ограничении	Фаза технологического процесса
Отказ 1-го канала изм. N КНД	Предупреждение
Отказ 2-го канала изм. N КНД	Предупреждение
Рассогласование по N КНД	Предупреждение
Отказ 1-го канала изм. N КВД	Предупреждение
Отказ 2-го канала изм. N КВД	Предупреждение
Рассогласование по N КВД	Предупреждение
Отказ 1-го канала изм. N СТ	Предупреждение
Отказ 2-го канала изм. N СТ	Предупреждение
Рассогласование по N СТ	Предупреждение
Отказ 1-й термопары Т газа за ТНД	Предупреждение
Отказ 2-й термопары Т газа за ТНД	Предупреждение
Отказ 3-й термопары Т газа за ТНД	Предупреждение

Отказ 4-й термопары Т газа за ТНД	Предупреждение
Отказ 5-й термопары Т газа за ТНД	Предупреждение
Отказ 6-й термопары Т газа за ТНД	Предупреждение
Отказ 7-й термопары Т газа за ТНД	Предупреждение
Отказ 8-й термопары Т газа за ТНД	Предупреждение
Перекус температурного поля	Предупреждение
Отказ канала изм. Т воздуха на входе ГТУ	Предупреждение
Отказ канала изм. Р воздуха за КВД	Предупреждение
Отказ канала изм. Р тг на измерительной диафрагме	Предупреждение
Отказ канала изм. Т тг после измерительной диафрагмы	Предупреждение
Отказ канала изм. Р тг на входе в Д	Предупреждение
Рассогласование по ДГ	Предупреждение
Отказ каналов изм. N КНД	Авария
Отказ каналов изм. N КВД	Авария
Отказ каналов изм. N СТ	Авария
Отказ каналов изм. Т газа за ТНД	Авария
Высокая N КНД	Авария
Высокая N КВД	Авария
Высокая N СТ	Авария
Высокая Т газа за ТНД	Авария
Рассогласование по ДГ	Авария
Обобщенная авария от регулятора топлива	Авария
Нет розжига	Авария
Погасание факела	Авария

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
Параметры работы ГПА, контролируемые
системой автоматического управления

Наименование переменной	Значение	Диапазон		Расшифровка параметров
		От	До	
1	2	3	4	5
Здесь задаются настройки типа FLOAT (плавающие настройки)				
MIN_ST_AO	1500	1500	8000	Авария по минимальным оборотам СТ, об/мин
MIN_KVD_AO	6500	2000	8000	Аварии по минимальным оборотам ТВД, об/мин
MIN_KND_AO	2000	2000	8000	Аварии по минимальным оборотам КНД, об/мин
MAX_PRESSURE	10000	0	10000	Авария по давлению, кПа
MAX_KVD	9850	3000	10000	Авария по ТВД
MAX_KND	5300	3000	6000	Авария по ТНД
MAX_ST	5600	3000	6000	Авария по СТ
MAX_TEMPER	787	100	1000	Авария по температуре
TIME_AO_TEMPER	1	0	2	Максимальное время превышения температурой аварии. По истечении этого времени – аварийный останов

1	2	3	4	5
BLOCK_TIME	2	0	3	Время задержки использования данных с канала, бывшего в обрыве, сек.
TIME_AO	0,2	0	1	Максимальное время обрыва или выхода за аварийные уставки показаний датчиков оборотов. Свыше этого времени – АО
TIME_NO_TEMPER	1	0	2	Максимальное время превышения температурой аварии. По истечении этого времени – переход в режим НО
LIMIT_DISTORT	80	0	1000	Ограничение перекоса температур. Свыше – предупреждение, град. С
MIN_REGUL_KVD	7000	2000	7000	Нижняя граница регул. по ТВД
MIN_REGUL_KND	2500	2000	5000	Нижняя граница регул. по ТНД
MIN_REGUL_ST	1600	1500	5000	Нижняя граница регул. по СТ
LIMIT_KVD	9700	5000	10000	Верхняя граница регулирования по ТВД
LIMIT_KND	5075	5000	10000	Верхняя граница регулирования по ТНД

1	2	3	4	5
LIMIT_ST	5285	1000	10000	Верхняя граница регулирования по СТ
LIMIT_TEMPER	737	500	1000	Верхняя граница регулирования по температуре перед ТВД
LIMIT_PRESSURE	2,4183	0	10000	Ограничение для регулирования по давлению
RATE_OPEN_WORK	20	0	100	Ограничение скорости пере-кладки ДУС, %/с
MAX_DISTORT_DUS	5	0	8	Максимальное рассогласование в положении и задании на ДУС, %
TIME_DISTORT_DUS	1	0	30	Если в течение этого времени рассогласование на ДУС №2 более чем MAX_DISTORT_DUS – АО, сек
SET_TEMPER_K	4	0	10	Коэффициент «просадки» задания при действии контура ограничения температуры

1	2	3	4	5
SET_DECREASE_TEMPER	5	0	100	Максимальная ширина снижения задания по температуре при включении ограничительного температурного контура, град. С
SET_DECREASE_PRESSURE	0,5	0	1	Ширина снижения задания по давлению при включении ограничительного контура давления, МПа
SET_DECREASE_ST	20	0	100	Ширина снижения задания по оборотам СТ при включении ограничительного контура СТ, об/мин
SET_INCREASE_ST	20	0	100	Ширина увеличения задания по оборотам СТ при включении нижнего ограничительного контура СТ, об/мин

1	2	3	4	5
SET_DECREASE_KVD	20	0	100	Ширина снижения задания по оборотам ТВД при включении верхнего ограничительного контура ТВД, об/мин
SET_INCREASE_KVD	20	0	100	Ширина увеличения задания по оборотам ТВД при включении нижнего ограничительного контура ТВД, об/мин
SET_DECREASE_KND	20	0	100	Ширина снижения задания по оборотам ТНД при включении верхнего ограничительного контура ТНД, об/мин
SET_INCREASE_KND	20	0	100	Ширина увеличения задания по оборотам ТНД при включении нижнего ограничительного контура ТНД, об/мин
SWITCH_TEMPER_K	0,7	0	1	Коэффициент отключения контура ограничения температуры

1	2	3	4	5
SWITCH_PRESSURE_K	0,07	0	1	Коэффициент отключения контура ограничения давления
SWITCH_HIGH_ST	0,7	0	1	Коэффициент отключения верхнего контура ограничения оборотов СТ
SWITCH_LOW_ST	0,7	0	1	Коэффициент отключения нижнего контура ограничения оборотов СТ
SWITCH_HIGH_KVD	0,7	0	1	Коэффициент отключения верхнего контура ограничения оборотов ТВД
SWITCH_LOW_KVD	0,7	0	1	Коэффициент отключения нижнего контура ограничения оборотов ТВД
SWITCH_HIGH_KND	0,7	0	1	Коэффициент отключения верхнего контура ограничения оборотов ТНД
SWITCH_LOW_KND	0,7	0	1	Коэффициент отключения нижнего контура ограничения оборотов ТНД

1	2	3	4	5
N_VD_HEAT	8000	3000	9000	Обороты, на которые ТВД выходит при пуске
MAX_DELTA_KVD	20	0	100	Максимальная разница отсчетов по каналам, Для выбраковки неисправности по ТВД
MAX_DELTA_ST	20	0	100	Максимальная разница значений по каналам, Для выбраковки неисправности по СТ
TIME_PROGNOS	0,5	0	60	Время опережающего прогноза температуры, с
RATE_ST	20	0	20	Номинальная скорость изменения задания на СТ по кнопкам РЧВ, (об/мин)/с
RATE_KVD	20	0	20	Номинальная скорость изменения задания на ТВД по кнопкам РЧВ, (об/мин)/с

1	2	3	4	5
RATE_KVD_START	80	0	100	Номинальная скорость изменения задания на ТВД на пуске, (об/мин)/с
RATE_PRESS	25	0	40	Номинальная скорость изменения задания на давление за ОК по кнопкам РЧВ, (кПа)/с
TERMOPAR_SHORT_CIRCUIT	5	0	1000	Уровень короткого замыкания
TERMOPAR_DELTA	100	0	100	Контрольная разница для выбраковки термопар
MAX_SWING_PLUME_DUS	30	0	200	Максимальный размах коридора от номинальных оборотов по условию погасания факела, %
MAX_DISTORT	1000	0	1000	Максимальный перекося температур. Свыше – авария, град. С
N_VD_DISTORT_AO	7990	0	9000	Обороты, свыше которых начинается авария по перекося поля, об/мин

1	2	3	4	5
TIME_SET_LIM_REGUL	5	1	30	Время «растяжки задания» при переключении контуров, с
LIN_K_ST	0,015	0	0,05	Величина линейного коэффициента корректирующей функции ST_to_open
FREE_K_ST	-7	-200	200	Величина свободного члена метода ST_to_open
LIN_K_KVD	0,015	0	0,05	Величина линейного коэффициента корректирующей функции KVD_to_open
FREE_K_KVD	-91	-200	200	Величина свободного члена метода KVD_to_open
LIN_K_KND	0,015	0	0,05	Величина линейного коэффициента корректирующей функции KND_to_open
FREE_K_KND	-17	-200	200	Величина свободного члена метода KND_to_open

1	2	3	4	5
LIN_K_TEMPER	0,117	0	0,4	Величина линейного коэффициента корректирующей функции Temper_to_open
FREE_K_TEMPER	-21	-200	200	Величина свободного члена метода Temper_to_open
LIN_K_PRESSURE	0,023	0	200	Величина линейного корректирующего коэффициента метода Pressure_to_open
FREE_K_PRESSURE	3	-200	200	Величина свободного члена метода Pressure_to_open
TEMPER_PRIVED	288	273	300	Температура приведения, град. К (Кельвина!!!)
TEMPER_FIRE_IS	300	50	300	Температура, при падении ниже которой факел считается погасшим, град. С
SHIFT_TEMPER_ON_LIGHTING	50	0	200	Бросок температуры, по которому фиксируется горение, град. С

1	2	3	4	5
MAX_P_FUEL	7,5	0	8	Максимально возможное давление топливного газа, МПа
MIN_P_FUEL	1,8	0	8	Минимально возможное давление топливного газа, МПа
K_prop_ST_ARGUS	3,00	0	20	Проп. к-т ПИД по СТ
K_diff_ST_ARGUS	0,15	0	5	Дифф. к-т ПИД по СТ
K_integ_ST_ARGUS	0,50	0	10	Интегр. к-т ПИД по СТ
DZ_ST_ARGUS	0,70	0	10	Зона нечувств.ПИД (СТ), об/мин
K_prop_VD_ARGUS	1,70	0	20	Проп. к-т ПИД по ТВД
K_diff_VD_ARGUS	0,10	0	5	Дифф. к-т ПИД по ТВД
K_integ_VD_ARGUS	0,40	0	10	Интегр. к-т ПИД по ТВД
DZ_VD_ARGUS	1,50	0	10	Зона нечувств.ПИД (ТВД), об/мин
K_prop_ND_ARGUS	2,50	0	20	Проп. к-т ПИД по ТНД
K_diff_ND_ARGUS	0,25	0	5	Дифф. к-т ПИД по ТНД
K_integ_ND_ARGUS	0,40	0	10	Интегр. к-т ПИД по ТНД
DZ_ND_ARGUS	3,00	0	10	Зона нечувств.ПИД (ТНД), об/мин
K_prop_T_ARGUS	3,00	0	20	Проп. к-т ПИД по температуре

1	2	3	4	5
K_diff_T_ARGUS	0,15	0	5	Дифф. к-т ПИД по температуре
K_integ_T_ARGUS	0,50	0	10	Интегр. к-т ПИД по темпер.
DZ_T_ARGUS	0,50	0	10	Зона нечувств.ПИД (темпер.), град. С
K_prop_P_KVD_ARGUS	4,50	0	20	Проп. к-т ПИД по давлению
K_diff_P_KVD_ARGUS	0,50	0	5	Дифф. к-т ПИД по давлению
K_integ_P_KVD_ARGUS	0,70	0	10	Интегр. к-т ПИД по давлению
DZ_P_KVD_ARGUS	20,00	0	100	Зона нечувств.ПИД (давл.), кПа
Rate_open_before_heat_ARGUS	4,00	0	10	Ск.откр.до прогрева, %/с
Rate_open_after_heat_ARGUS	4,00	0	10	Ск.откр.после прогрева, %/с
Fix_dus_open_ARGUS	27,50	0	40	Открытие ДУС для розжига, %
Здесь задаются целочисленные настройки				
MAX_K		4		Максимальное количество неисправных термомпар подряд
MIN_NORM_TERMOPAR		1		Минимально допустимое количество исправных термомпар. Если количество исправных термомпар меньше – НО

Учебное издание

*Санчугов Валерий Иванович,
Шахматов Евгений Владимирович*

**АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ
С ГАЗОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ**

Учебник

Редактор Н.С. Купринова
Компьютерная верстка Л.Р. Дмитриенко

Подписано в печать 31.10.2017. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печ. л. 16,25.
Тираж 200 экз. Заказ 144.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЕВА»
(Самарский университет)
443086 Самара, Московское шоссе, 34.