
**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
ПОСТРОЕНИЯ
И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
АСУ ТП**

**Труды
Международной научной
конференции**

CONTROL-2008

14 — 16 октября 2008 г.

МОСКВА

МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(технический университет)

**ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПОСТРОЕНИЯ
И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСУ ТП**

Труды
Международной научной
конференции

CONTROL-2008

14 — 16 октября 2008 г.

МОСКВА

УДК 658.51.011.56
ББК 32.965.5
Т 338

Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП:

Труды Международ. науч. конф. — М.: Издательский дом МЭИ. 2008. с., ил.
ISBN 5 — 7046 — —

В сборнике публикуются труды участников Международной научной конференции «Control-2008», состоявшейся 14 — 16 октября 2008 г. в Московском энергетическом институте (техническом университете).

Представленные материалы отражают современные направления развития и применения автоматизированных систем управления в энергетике и промышленности.

Доклады отпечатаны методом прямого репродуцирования с авторских оригиналов.

The Theory and Practice of Creation and Operation of Technological Processes Computer Aided Control Systems: Proceedings of the International scientific conference «Control-2008», Moscow: Издательский дом МЭИ. 2008. pp.

Participants' works of the International scientific conference which taken place the October 14 — 16, 2008 at Moscow Power Engineering Institute (technical university) are published.

The submitted materials reflect modern directions in development and application of the energetic and industrial automated control systems.

Papers are printed by a direct reproduction method from author's originals.

Редакционная коллегия
Г.А. Пикина, С.В. Мезин

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.	
<i>Андрюшин А.В., Панько М.А.</i> Лабораторный комплекс кафедры АСУ ТП для подготовки специалистов по автоматизации технологических процессов.	
<i>Зверьков В.П., Кузицин В.Ф., Павлов С.П., Петроченко Ю.Н., Вишнякова Ю.Н.</i> Электронный образовательный ресурс «Динамика систем управления тепловыми процессами».	
<i>Аракелян Э.К., Саркисян Р.Е.</i> Концептуальные и аналитические основы построения СППР для оперативно-диспетчерского управления энергетическими компаниями.	
<i>Ротач В.Я.</i> Об особенностях критериев оптимальности систем автоматического управления технологическими процессами.	
<i>Пащенко Ф.Ф., Поляков М.А., Дургарян И.С.</i> Прогнозирующие модели в системах поддержки принятия решений.	
<i>Пикина Г.А., Войлова О.В.</i> Способность аналитических моделей отражать особенности гидродинамических характеристик котлов.	
<i>Усенко В.В.</i> Полная автоматизация вычислений с помощью формулы Мейсона.	
<i>Усенко В.В.</i> Алгоритм декомпозиции систем на подсистемы и его реализация.	
<i>Аракелян Э.К., Мезин С.В., Невзгодин В.С.</i> Построение оптимального алгоритма логической пошаговой программы пуска ПГУ-450	
<i>Мерзликина Е. И.</i> Оптимизация распределения нагрузки по энергоблокам ТЭС с учетом неопределенности исходной информации.	
<i>Бочкарёва Е.Ю., Сабанин В.Р., Фейгина А.Н.</i> Имитационное моделирование в задачах анализа и синтеза автоматических систем регулирования.	
<i>Бочкарёва Е.Ю., Фейгина А.Н., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И.</i> Имитационное моделирование и оптимизация нелинейных систем управления.	
<i>Колосов О.С., Подольский Д.С., Сухецкий А.П.</i> Динамика параллельно работающих на общую нагрузку автоматических систем.	
<i>Репин А.И., Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Максимов А.Н., Игнатенко А.Н.</i> Математическое и программное обеспечение алгоритмов идентификации и адаптации АСР и их реализация в современных ПТК.	
<i>Аракелян Э.К., Мезин С.В., Роман М.Р.</i> Обеспечение запаса устойчивости при разработке и настройке фаззи-контроллера.	
<i>Бочаров М.Г., Панько М.А.</i> Анализ соответствия теоретических и реальных алгоритмов микропроцессорных контроллеров.	
<i>Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.</i> Выбор и оптимизация форсирующих командных устройств в системе автоматического управления мощностью энергоблока.	
<i>Давыдов Н.И., Зорченко Н.В.</i> Анализ результатов сертификационных испытаний энергоблоков 200, 300, 800 МВт, проведённых при участии органа по добровольной сертификации при ОАО «ВТИ»	
<i>Коптев В.С., Прохоров А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И., Костык В.И.</i> Интеллектуальная система экстремального регулирования экономичности работы газовых вихревых горелок паровых и водогрейных котлов с использованием косвенного сигнала по звуковому давлению факела горелок.	
<i>Крохин Г.Д., Мухин В.С.</i> Оценка долговечности турбогенераторов на базе нечетких моделей состояния.	

<i>Лесничук А.Н., Плетнев Г.П., Галайда Д.В.</i>	
Система технической диагностики теплонпряженности экранных поверхностей нагрева в топке барабанного котла.	
<i>Щедеркина Т.Е., Белов М.С., Бараненко В.И., Скоморохова Т.М.</i>	
Управление сроком службы теплообменных трубок парогенераторов АЭС с использованием вероятностного подхода.	
<i>Парчевский В.М.</i>	
Измерение степени рециркуляции дымовых газов в паровых котлах.	
<i>Саков И.А.</i>	
Прикладные аспекты разработки и применения низковольтного регулируемого электропривода для насосов собственных нужд ТЭС.	
<i>Обуваев А.С.</i>	
Особенности котлов-утилизаторов парогазовых установок как объектов управления при пуске и останове.	
<i>Лопатин В.В., Трофимов А.В.</i>	
Система автоматизированного проектирования АСУ ТП ТЭЦ.	
<i>Андрюшин А.В., Мадоян А.А.</i>	
Перевод угольной энергетики на новую модель технологической инновации с обеспечением полной безотходности и ресурсосбережения.	
<i>Саркисян Р.Е.</i>	
Предпочтения, полезность и меры чувствительности для многокритериальных решений.	
<i>Плацил Ян</i>	
Основные принципы построения систем теплоснабжения с применением современного оборудования автоматизации.	
<i>Н.А. Агафонова, Ю.В. Наумов, С.А. Таламанов</i>	
Интервальные оценки характеристик объектов управления на основе архивных трендов сигналов, регистрируемых ПТК АСУ ТП.	
<i>Тверской Д.Ю., Маршалов Е.Д.</i>	
Исследование нелинейной динамической модели пылесистемы прямого вдувания топлива с молотковыми мельницами.	
<i>Кондрашин А.В.</i>	
Гибридные имитационные модели сложных теплоэнергетических объектов управления.	
<i>Таланов В.Д., Таланов С.В.</i>	
Разработка и исследование алгоритма широтно-импульсного модулятора в среде LabVIEW.	
<i>Hampel R.</i>	
Fuzzy-algorithm in practice applications.....	
Contents.	
Список участников.	
List of Participants.	

Международная научная конференция **Control-2008** проводится в рамках мероприятий, посвященных 65-летию основания кафедры «Автоматизированные системы управления тепловыми процессами (АСУ ТП)» Московского энергетического института (технического университета).

Эта конференция как и предыдущие Control-2000, Control-2003 и Control-2005 отражает современное состояние актуальных для теории и практики проблем построения автоматизированных систем управления в энергетике и промышленности. В представленных на конференцию докладах рассматриваются вопросы развития теории моделирования, оптимального управления, принятия решений, диагностики и прогнозирования. Значительное внимание уделено практическим вопросам модернизации учебных лабораторий кафедры, совершенствованию и использованию инновационных подходов в методологии обучения студентов. Ряд докладов освещают проблемы проектирования и результаты практического внедрения автоматизированных систем управления.

Среди авторов представленных в сборнике докладов известные ученые страны, коллеги из зарубежных вузов-партнеров, выпускники кафедры АСУ ТП, работающие не только в МЭИ, но и в других организациях, аспиранты, обучающиеся на кафедре.

Кафедра благодарит всех участников за сотрудничество в подготовке конференции.

The international scientific conference **Control-2008** is carried out within the framework of events, devoted to 65 anniversary of the Moscow Power Engineering Institute (technical university) department «Automated Control Systems of Thermal Processes (ACS TP)».

This conference as well as previous Control-2000, Control-2003 and Control-2005 reflects a modern condition actual for the theory and practice problems in construction of Computer Aided Control Systems for the technological processes in energetic and industry.

Such questions as developments of modeling and optimal control theory, making decisions, diagnose, predicting, are considered in submitted for the conference reports. A quite big attention is taken place towards practice of studying laboratories modernization, making better and using innovation ways the teaching methodology the students. Several papers are light the design problems and some practical results in automatic control system running.

Among the authors of the papers, submitted in the collection, the famous Russia Scientifics, colleagues from the foreign high school-partners, the graduates of Department of the Automated control systems of thermal processes working not only in MPEI, but outside university either, post-graduate students training on the Department.

Our Department thanks all participants for cooperation in preparing the conferences

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие.	
<i>Андрюшин А.В., Панько М.А.</i>	
Лабораторный комплекс кафедры АСУ ТП для подготовки специалистов по автоматизации технологических процессов.	
<i>Зверьков В.П., Кузицин В.Ф., Павлов С.П., Петроченко Ю.Н., Вишнякова Ю.Н.</i>	
Электронный образовательный ресурс «Динамика систем управления тепловыми процессами».	
<i>Аракелян Э.К., Саркисян Р.Е.</i>	
Концептуальные и аналитические основы построения СППР для оперативно-диспетчерского управления энергетическими компаниями.	
<i>Ротач В.Я.</i>	
Об особенностях критериев оптимальности систем автоматического управления технологическими процессами.	
<i>Пащенко Ф.Ф., Поляков М.А., Дургарян И.С.</i>	
Прогнозирующие модели в системах поддержки принятия решений.	
<i>Пикина Г.А., Войлова О.В.</i>	
Способность аналитических моделей отражать особенности гидродинамических характеристик котлов.	
<i>Усенко В.В.</i>	
Полная автоматизация вычислений с помощью формулы Мейсона.	
<i>Усенко В.В.</i>	
Алгоритм декомпозиции систем на подсистемы и его реализация.	
<i>Аракелян Э.К., Мезин С.В., Невзгодин В.С.</i>	
Построение оптимального алгоритма логической пошаговой программы пуска ПГУ-450	
<i>Мерзликина Е. И.</i>	
Оптимизация распределения нагрузки по энергоблокам ТЭС с учетом неопределенности исходной информации.	
<i>Бочкарёва Е.Ю., Сабанин В.Р., Фейгина А.Н.</i>	
Имитационное моделирование в задачах анализа и синтеза автоматических систем регулирования.	
<i>Бочкарёва Е.Ю., Фейгина А.Н., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И.</i>	
Имитационное моделирование и оптимизация нелинейных систем управления.	
<i>Колосов О.С., Подольский Д.С., Сухецкий А.П.</i>	
Динамика параллельно работающих на общую нагрузку автоматических систем.	
.	
<i>Репин А.И., Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Максимов А.Н., Игнатенко А.Н.</i>	
Математическое и программное обеспечение алгоритмов идентификации и адаптации АСР и их реализация в современных ПТК.	
<i>Аракелян Э.К., Мезин С.В., Роман М.Р.</i>	
Обеспечение запаса устойчивости при разработке и настройке фаззи-контроллера.	
<i>Бочаров М.Г., Панько М.А.</i>	
Анализ соответствия теоретических и реальных алгоритмов микропроцессорных контроллеров.	
<i>Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.</i>	
Выбор и оптимизация форсирующих командных устройств в системе автоматического управления мощностью энергоблока.	
<i>Давыдов Н.И., Зорченко Н.В.</i>	
Анализ результатов сертификационных испытаний энергоблоков 200, 300, 800 МВт, проведенных при участии органа по добровольной сертификации при ОАО «ВТИ»	
<i>Коптев В.С., Прохоров А.В., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И., Костык В.И.</i>	
Интеллектуальная система экстремального регулирования экономичности работы газовых вихревых горелок паровых и водогрейных котлов с использованием косвенного сигнала по звуковому давлению факела горелок.	
<i>Крохин Г.Д., Мухин В.С.</i>	
Оценка долговечности турбогенераторов на базе нечетких моделей состояния.	

<i>Лесничук А.Н., Плетнев Г.П., Галайда Д.В.</i>	
Система технической диагностики теплонпряженности экранных поверхностей нагрева в топке барабанного котла.	
<i>Щедеркина Т.Е., Белов М.С., Бараненко В.И., Скоморохова Т.М.</i>	
Управление сроком службы теплообменных трубок парогенераторов АЭС с использованием вероятностного подхода.	
<i>Парчевский В.М.</i>	
Измерение степени рециркуляции дымовых газов в паровых котлах.	
<i>Саков И.А.</i>	
Прикладные аспекты разработки и применения низковольтного регулируемого электропривода для насосов собственных нужд ТЭС.	
<i>Обуваев А.С.</i>	
Особенности котлов-утилизаторов парогазовых установок как объектов управления при пуске и останове.	
<i>Лопатин В.В., Трофимов А.В.</i>	
Система автоматизированного проектирования АСУ ТП ТЭЦ.	
<i>Андрюшин А.В., Мадоян А.А.</i>	
Перевод угольной энергетики на новую модель технологической инновации с обеспечением полной безотходности и ресурсосбережения.	
<i>Саркисян Р.Е.</i>	
Предпочтения, полезность и меры чувствительности для многокритериальных решений.	
<i>Плацил Ян</i>	
Основные принципы построения систем теплоснабжения с применением современного оборудования автоматизации.	
<i>Н.А. Агафонова, Ю.В. Наумов, С.А. Таламанов</i>	
Интервальные оценки характеристик объектов управления на основе архивных трендов сигналов, регистрируемых ПТК АСУ ТП.	
<i>Тверской Д.Ю., Маршалов Е.Д.</i>	
Исследование нелинейной динамической модели пылесистемы прямого вдувания топлива с молотковыми мельницами.	
<i>Кондрашин А.В.</i>	
Гибридные имитационные модели сложных теплоэнергетических объектов управления.	
<i>Таланов В.Д., Таланов С.В.</i>	
Разработка и исследование алгоритма широтно-импульсного модулятора в среде LabVIEW.	
<i>Hampel R.</i>	
Experiences with the bologna process at the university of applied sciences Zittau/Görlitz	
Contents.	
Список участников.	
List of Participants.	

АНАЛИЗ СООТВЕТСТВИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И РЕАЛЬНЫХ АЛГОРИТМОВ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты анализа соответствия характеристик теоретических и виртуальных аналоговых регуляторов, реализуемых в микропроцессорных контроллерах Р-380 ПТК КВИНТ.

В контроллерах программно-технических комплексов используется цифровая реализация алгоритмов регулирования. При этом разработчики стремятся к тому, чтобы программная реализация регулятора в максимальной степени соответствовала аналоговому идеальному ПИ- или физически реализуемому ПИД-алгоритмам. В данной работе производится оценка такого соответствия для аналоговых регуляторов, программно реализуемых в контроллерах Р-380 ПТК «КВИНТ СИ» («НИИТеплоприбор» — ООО «КВИНТсистема», Москва). Сравниваются переходные характеристики виртуальных, реализуемых контроллером регуляторов с теоретическими характеристиками идеальных и эквивалентных аналоговых ПИ- и ПИД-регуляторов (табл.1.).

Под эквивалентным аналоговым понимается регулятор с цифровой реализацией алгоритма и непрерывным входом и выходом. Схема исполнения ПИД-регулятора в контроллерах показана на рис. 1. Виртуальный регулятор $W_p(s)$ содержит звенья фильтрации (ФИЛ), нечувствительности (ЗОН), цифровой реализации алгоритма $W_p(z)$, запрета (ЗПР) и ограничения (ОГР). В контроллере КВИНТ программа вычислительного устройства соответствует реализации алгоритма регулирования (5). Для получения ПИ-регулятора постоянная дифференцирования приравняется к нулю ($T_d = 0$).

Проведенные исследования подтвердили стабильность АЦП преобразования и отсутствие помехи от «шумов» квантования, что позволило исключить из рассмотрения звено фильтрации ФИЛ ($T_f = 0$). Переходные характеристики виртуальных регуляторов определялись при нулевом значении зоны нечувствительности $x_{зон}$ для ряда значений параметров настройки и двух значениях интервала квантования сигнала по времени: 10, 100 мс.

Т а б л и ц а 1

Передаточные функции ПИ- и ПИД-алгоритмов

Регулятор	Передаточная функция
Идеальный ПИ	$W_p(s) = k_p(1 + 1/(T_n s))$ (1)
Эквивалентный аналоговый ПИ при цифровой реализации алгоритма (1)	$W_p(s) = (k_p / T_s)[1 - \exp(-Ts) + T/T_n]$ (2)
Идеальный ПИД	$W_p(s) = k_p(1 + 1/(T_n s) + T_d s)$ (3)
Эквивалентный аналоговый ПИД при цифровой реализации алгоритма (3)	$W_p(s) = (k_p / T_s)[(T/T_n + 1 + T_d / T) - (1 + 2 T_d / T) \exp(-Ts) + T_d / T \exp(-2Ts)]$ (4)
Физически реализуемый аналоговый ПИД	$W_p(s) = k_p[1 + 1/(T_n s) + T_d s / (0.125 T_d s + 1)^2]$ (5)
Эквивалентный аналоговый ПИД при цифровой реализации алгоритма (5)	$W_p(s) = k_p \cdot \frac{1 - \exp(-T \cdot s)}{Ts} + \frac{k_p}{T_n s} - k_p T_d \cdot \frac{[1 - \exp(-T / 0.125 \cdot T_d)]^2}{[\exp(Ts) - \exp(-T / 0.125 \cdot T_d)]^2} \cdot \frac{(1 - \exp(-Ts))^2}{T^2}$ (6)

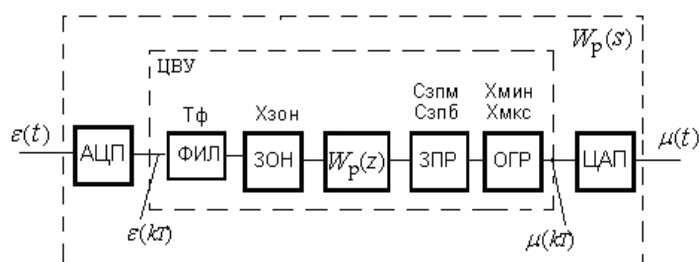


Рис. 1. Схема исполнения ПИД-регулятора в контроллерах

Сравнение переходных характеристики цифрового (2), эквивалентного аналогового ПИ-регулятора (3) и экспериментальных (реальных) характеристик при интервале квантования по времени $T = 0,1$ с свидетельствует о практически полном их соответствии. В подавляющем большинстве случаев инерционность объектов энергетики такова, что влиянием интервала квантования на параметры настройки можно пренебречь, и расчет настроек проводить по характеристике идеального ПИ-регулятора. Существуют методы расчета настроек регулятора с учетом влияния квантования по времени [1, 2].

На рис. 2 представлены переходные характеристики ПИД-алгоритмов (4) и (6) (см. табл. 1) и экспериментальная характеристика реализуемого контроллером виртуального ПИД-регулятора (соответственно кривые 1, 2 и 3) для настроек реального регулятора [2]

$k_p = 5,86$; $T_n = 2,23$ мин; $T_d = 2,03$ мин
при значении интервала квантования по времени $T = 0,1$ с.

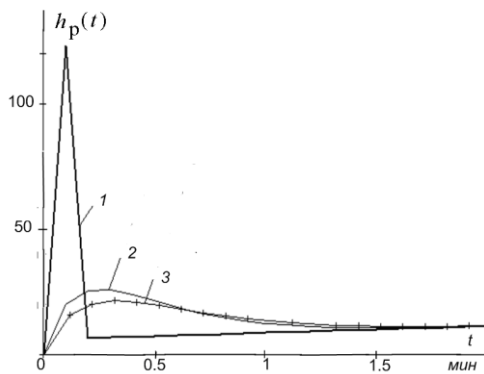


Рис. 2.

Как видно, характеристика реализуемого контроллером виртуального регулятора заметно отличается от характеристики не только идеального, но и физически реализуемого ПИД-алгоритма (4). Выявлено также отклонение экспериментальной переходной характеристики от соответствующей уравнению (6) теоретической. С уменьшением значения интервала квантования по времени это расхождение снижается.

На рис. 3 показаны комплексные частотные характеристики регуляторов (4) (кривая 1) и (6) (кривая 2).

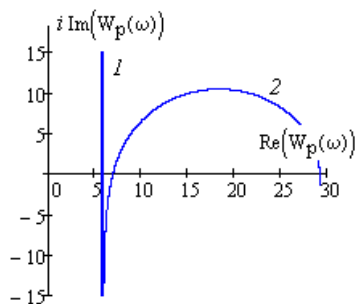


Рис. 3.

Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики, соответствующие передаточным функциям (4) и (6) (кривые 1 и 2), показаны на рис. 4, а и б.

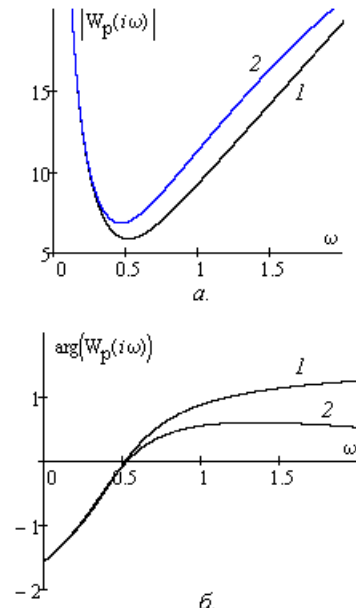


Рис. 4.

Из сравнения частотных характеристик идеального и физически реализуемого цифровыми средствами регулятора (4) следует, что в рассматриваемой области частот относительное отклонение его характеристик от характеристик идеального ПИД-регулятора при принятии в контроллерах Р-380 ПТК КВИНТ значения интервала квантования по времени 0,01 и 0,1 с не превышает 0,1 %.

Аналоговый идеальный ПИД-алгоритм физически не реализуем. Соответственно в реальном аналоговом ПИД-регуляторе для получения дифференциальной составляющей используют дифференцирующее звено с передаточной функцией вида

$$W_d(s) = k_p T_d s \cdot W_\phi(s) = k_p T_d s / (T_\phi s + 1)^n,$$

где k_p — коэффициент передачи регулятора; T_d — постоянная дифференцирования; T_ϕ — постоянная времени фильтра; $n = 1$ или 2.

В алгоритме контроллера Р-380 приняты значения $T_\phi = T_d / 8$; $n = 2$.

Оценим влияние на общие свойства системы структуры фильтра при дифференциальной составляющей в алгоритме регулирования контроллера.

На рис. 5 показаны линии заданного запаса устойчивости $m = 0,366$ (m — корневой показатель колебательности) при критическом для идеального алгоритма значении отношения постоянной дифференцирования к постоянной интегрирования $\alpha = T_d / T_n = 0,75$. Кривая 1 соответствует АСР с идеальным ПИД-алгоритмом, кривые 2 и 3 — соответственно алгоритмам с фильтрами при

дифференциальной составляющей первого и второго порядка ($T_\phi = T_d / 8$).

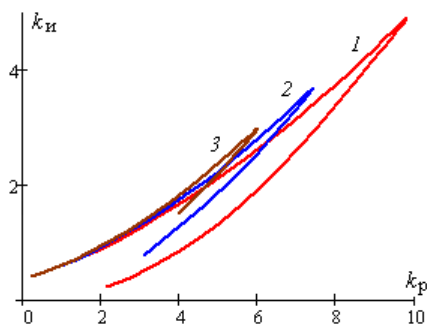


Рис. 5.

Как видно, введение фильтра в дифференциальную составляющую алгоритма регулирования:

- 1) практически не оказывает влияния на значение $\alpha_{\text{крит}}$ — форма линий $m = \text{const}$ остается неизменной;
- 2) приводит к заметному уменьшению значения $(k_{\text{и}})_{\text{макс}}$ и, следовательно, к увеличению линейного интегрального критерия качества;
- 3) сужает область, ограниченную линией заданного запаса устойчивости.

Соотношение между показателями запаса устойчивости в АСР с ПИД-алгоритмом существенно отличается от наблюдаемого в системах с ПИ-алгоритмом. Настройкам в окрестности $(k_{\text{и}})_{\text{макс}}$ соответствуют значения максимума КЧХ замкнутой системы по каналу управляющего воздействия, выходящие за область допустимых границ $1,55 > M_{\text{макс}} > 2,38$.

С учетом этих особенностей расчет робастных настроек ПИД-регулятора определяется следующими условиями [1]:

- 1) критерием запаса устойчивости $m = 0,366$ и $M = 2,38$;
- 2) показателем (критерием) качества $\alpha = \alpha_{\text{крит}}$.

Применение критерия $m = m_{\text{доп}}$ и $M = M_{\text{доп}}$ устраняет неопределенность в соотношении между показателями запаса устойчивости m , M , и ψ и позволяет формализовать процедуру выбора настроек ПИД-регулятора [1]. Точка, соответствующая оптимальным настройкам, в этом случае располагается на нижней ветви линии $m = m_{\text{доп}}$ при значении $k_{\text{и}} \approx 0,89(k_{\text{и}})_{\text{макс}}$. Параметры настройки АСР с идеальным ПИД и реальными алгоритмами с фильтрами первого и второго порядка ($T_\phi = T_d / 8$; $\alpha_{\text{крит}} = 0,75$) приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Параметры настройки АСР

n	k_p	$k_{\text{и}}$	$T_{\text{и}}$	T_d
0	9,30	4,36	2,1330	1,599
1	6,97	3,27	2,1314	1,598
2	5,68	2,66	2,1353	1,601

Заметим, что параметры фильтра практически не влияют на значения постоянных интегрирова-

ния $T_{\text{и}}$ и дифференцирования T_d . В зависимости от порядка фильтра изменяется только коэффициент передачи регулятора k_p .

АЧХ замкнутой системы по каналу управляющего воздействия для этих вариантов АСР представлены на рис. 6, а.

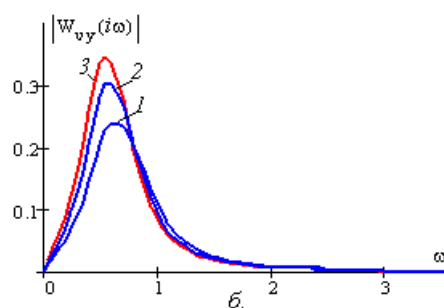
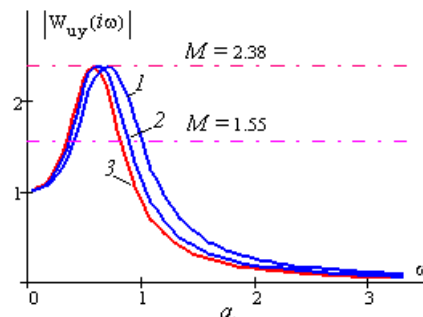


Рис. 6.

Как видно, при введении фильтра максимум АЧХ смещается к началу координат. Переход к «реальным» алгоритмам уменьшает чувствительность АСР к высокочастотной помехе по каналу управляющего воздействия и увеличивает чувствительность системы к составляющим спектра возмущения по каналу регулирующего воздействия в окрестности резонансной частоты.

Из-за уникальности характеристик возмущающих воздействий целесообразно иметь в библиотеке алгоритмов контроллера все рассмотренные варианты ПИД-регулятора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панько М.А. Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде MathCAD. М.: Издательство МЭИ, 2004.
2. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004.

EXPERIENCES WITH THE BOLOGNA PROCESS AT THE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES ZITTAU/GÖRLITZ

ABSTRACT

The paper gives an overview of the European and German Qualification Framework for higher education of the universities as the basis for the realisation of the Bologna Process at the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz.

A brief description will show the results of the learning and teaching processes for the graduates regarding the competences. The definition of the content of the competences is not consistent. At our University we defined three competence fields, specialised knowledge, methods and social competences.

As an instrument for the quality management and also for the creation of the study courses, we use a "Module Database". For the documentation of the education results we prepare the "Diploma Supplement", an international accepted document.

1. INTRODUCTION

Basis for the establishment of the Bachelor and Master study courses in Germany are the eight levels of the European Qualification Framework (Brussels 2005) and the Qualification Framework of the German University Degrees according to an agreement with the resolution of the Conference of the Ministers of Education 2005. The main aims are:

- Compatibility with the European Qualification Framework
- General description of the Qualification without relation to the specification
- General description of the Qualification without relation to the type of University
- Integration of all relevant group of persons

With help of this is given:

A framework of comparable and compatible university degrees regarding the qualification and the workload, level, learning results, competences and profile

For this it is necessary to check critical:

- the teaching content
- the methods of teaching and learning

This process should be continuous in relation of the state science and technology. This is a specific task for the universities. It's also necessary to make legal requirement in all countries and states which save, that the results of teaching and learning for all students will be accepted in all European countries.

The instruments were developed at the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz for the realisation of the development of the new study course schedules and examination schedules.

- [Module Database](#) for subjects
- System of quality management for the development of study course schedules and examination schedules

2. THE EUROPEAN AND GERMAN QUALIFICATION FRAMEWORK

The European Qualification Framework includes eight levels of qualification. They are described very brief in table 1 (Learning outcomes relevant to level – knowledge).

Not included are the problems of "long life learning" which have an increasing meaning in the near future. That is given for all qualification levels and sciences. The German association of industry discussed the Qualification Framework intensively. The reason for it is the increasing if the lack regarding high qualified and skilled workers and academics.

Table 1

Descriptors defining levels in the European Qualifications Framework (EQF)

	Knowledge
	In the context of EQF, knowledge is described as theoretical and/or factual
Level 1	basic general knowledge
Level 2	basic factual knowledge of a field of work or study
Level 3	knowledge of facts, principles, processes and general concepts, in a field of work or study
Level 4	factual and theoretical knowledge in broad contexts within a field of work or study
Level 5	comprehensive, specialised, factual and theoretical knowledge within a field of work or study and an awareness of the boundaries of that knowledge
Level 6	advanced knowledge of a field of work or study, involving a critical understanding of theories and principles
Level 7	highly specialised knowledge, some of which is at the forefront of knowledge in a field of work or study, as the basis for original thinking and/or research critical awareness of knowledge issues in a field and at the interface between different fields
Level 8	knowledge at the most advanced frontier of a field of work or study and at the interface between fields

The German Qualification Framework is nearly identical to the European Qualification Framework. It also includes eight levels with the definition of the basis competencies:

- Specification competence
- Social competence
- Personal competence

The author's opinion is, that important topics were formulated in the position paper of the German industry:

- The German Qualification Framework should include the whole education system with reflection to the action competence.
- The aim is the improvement of the transparency and openness.
- It should include all education parts.
- The principle of voluntary nature should be accepted.
- No new and more bureaucracy
- Description of the education levels with help of descriptors.

On the basis of the former descriptions we have at the universities in Germany the world wide accepted three level education system:

- Bachelor
- Master
- Doctor degree

If we compare the European Qualification Framework with the proposal of the German industry, we can see that the discussion about the necessary competences is not closed. For the graduated level Bachelor and Master are recommend the competences in summarised in table 2.

Regarding the study courses for engineers and natural scientists in some countries is discusses about the role of the qualification level "Diploma" (Note: In Germany we have a federalist structure with different laws.). For this it is necessary to take in consideration, that we have three levels of Diploma depended of the kind of university.

Diploma (BA) - University of Cooperative Education

Diploma (FH)- University of Applied Sciences
Diploma University

In those three levels the study time is different between three and five years. A further problem is the fact, that in the PhD courses more teaching activity is given. The basis of the doctorate is the independent scientific work. The thesis is a contribution for further development of the discipline of science. In this ranch the proof of a higher knowledge and competences in comparison to the level Diploma or Master takes place. The majority of the German Universities and Universities of Applied Sciences follow this principle. New are so called "Graduates Colleges" which are helpful for the support of the independent scientific work. There is no compensation with examinations.

Table 2.
Competences for the graduated level Bachelor and Master (Resolution of the Conference of Ministers of Education, 21.04.2005)

	Competences		
	Instru-mental	Systematic	Communicative
Bachelor	Using knowled-ge for activities at work and develop solutions for prob-lems	1. collecting, judging and interpreting in-formations 2. decisions that can be scientifically ex-plained considering social and ethical knowledge 3. ability to inde-pendently gather knowledge (learning process)	1. formulat-ing and ex-plain solu-tions for problems 2. infor-mation ex-change 3. responsi-bility with(in?) a team
Master	Using knowled-ge in new situa-tions in a wide or multi discipli-nary relation	1. Integrating knowledge (com-plexity) 2. decisions (made without/with incom-plete informations) that can be scientifi-cally explained con-sidering social and ethical knowledge 3. acquire knowledge independently 4. independent research and application-oriented projects	1. convey the current status of re-search and application 2. infor-mation ex-change 3. special responsi-bility

The table 3 and 4 as well as the fig. 1 give an actual overview about the process of conversion of the study courses in Germany.

Table 3
Bachelor and Master study courses at different kinds of universities 2008

Kind of university	all study courses	Share			
		Bachelor	Master	Sum	% von insg.
Universities	7.436	2.649	1.976	4.625	62,2
Universities of Art/Music	706	56	48	104	14,7
Universities of Applied Sciences	3.227	1.836	1.041	2.877	89,2
All kinds of universities	11.369	4.541	3.065	7.606	66,9

source: HRK-Hochschulkompass, 01.03.2008 (SoSe 2008)

Table 4.
Bachelor and Master study courses for different disciplines 2008

Disciplin	all study courses	share			
		BA	MA	sum	%
Agriculture, Forest, Feeding	229	102	93	195	85,2
Medicine, Health	707	254	200	454	64,2
Engineering	2.272	1.141	738	1.879	82,7
Art and Music	1.092	206	107	313	28,7
Mathematics, Natural Science	2.246	971	608	1.579	70,3
Law, Economy, Social Science	2.377	1.033	931	1.964	82,6
Language and Culture	4.593	1.531	760	2.291	49,9
SUM	11.369	4.541	3.065	7.606	66,9
source: HRK-Hochschulkompass, 01.03.2008 (SoSe 2008)					

It is clear to see, that the process of conversion the type of study courses is mostly in progress at the University of Applied Sciences.

3. BACHELOR AND MASTER STUDY COURSES AT THE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES ZITTAU/GÖRLITZ

Fig. 2 presents the academic calendars in comparison between Universities, Universities of Applied Sciences and staged study courses according in the Bologna-Process. A significant characteristic is the transition from the division in basic studies and main studies to the staged degrees. For every semester 30 ECTS points (European Transfer Credit System) are assigned. There are two possibilities for the transition of basic studies to main studies:

- Consecutive study course (normally the same term and the same university)
- constructive Master study course

Whereas in consecutive study courses the specialisation (the deepening of knowledge) takes place, constructive master study courses are aligned to expand knowledge (e.g. Business Administration for electrical engineers).

Fig. 3 shows the possible versions of a basic study course. The admission for students who transfer to another university is assured (under the condition that the receiving university approves of the accomplished achievements for the particular degree in the form of ECTS points). For the transition from a Bachelor study course consisting of 6 semester (180 ECTS points) to a Master study course consisting of 2 semester (60 ECTS points) individual regulations within universities are necessary.

The following synonyms are permitted for the classification of Bachelor (B) and Master degrees:

of Arts B. A.; M. A.
of Science B. Sc.; M. Sc.
of Engineering B. Eng.; M. Eng.
of Laws BLLB; LLM

Terms for the degrees of non-consecutive and continuative Master study courses are not specified/mandatory.

The faculties of the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz

- Faculty of Languages
- Faculty of Civil Engineering
- Faculty of Electrical and Information Engineering
- Faculty of Computer Science
- Faculty of Mechanical Engineering
- Faculty of Mathematics/Natural Sciences
- Faculty of Applied Social Studies
- Faculty of Economics

offers 31 study courses, which are

- 11 Bachelor study courses
- 7 combined Bachelor/Diploma study courses
- 6 Diploma study courses
- 7 Master study courses

For natural-scientific and engineer-scientific study courses most of the time 7 semesters are planned for the Bachelor's degree because of the required professional qualification. For the consecutive Bachelor/Master study courses the combination of 6 – 4 semesters is realised.

Because of the not yet completely concluded discussion about the classification of the Diploma degree the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz also offers a combination of Bachelor and Diploma study courses.

As a confirmation of the teaching contents and learning contents as well as the acquired competence a „Diploma supplement“ is handed over to the graduates along with the report or with a change of university. This Diploma Supplement contains

- Personal data of the holder of the qualification
- Information about the qualification
- Information about the level of the qualification
- Information about the content and the results
- Information about the status of the qualification
- Certification
- Information about the national system of higher education

Module descriptions have a special relevance for the classification of the subjects in the study and examination regulations as well as a proof of the acquired level of qualification. They include:

- chronological placement of the course
- study period
- examinations
- teaching contents
- professional competences
- competences independent from subjects
- necessary and recommended preconditions

- literature

With the purpose to optimise the number of examinations the first semester should be finished with no more than 6 modules and a total of 30 ECTS points. To reach a very good ... and multiple use of the modules, each module should contain 5 ECTS points. The University of Applied Sciences Zittau/Görlitz agreed on integrating „General studies“, „Ecology“ and „Interculturalism“ as well as the foreign language education into the study schedules.

4. SUMMARY

On the basis of the recommendations of the European and German Qualification Framework was introduced at the University of Applied Sciences the new staged education system

Bachelor – Master – PhD

The process of conversion is mostly finished (in Germany, for Universities of Applied Sciences 90%). Parallel Bachelor and Diploma study courses are partially still offered, also at the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz.

As an important instrument for planning the study courses and saving the quality, we have made very good experiences with the “Diploma Supplement” and the “Module Database”.

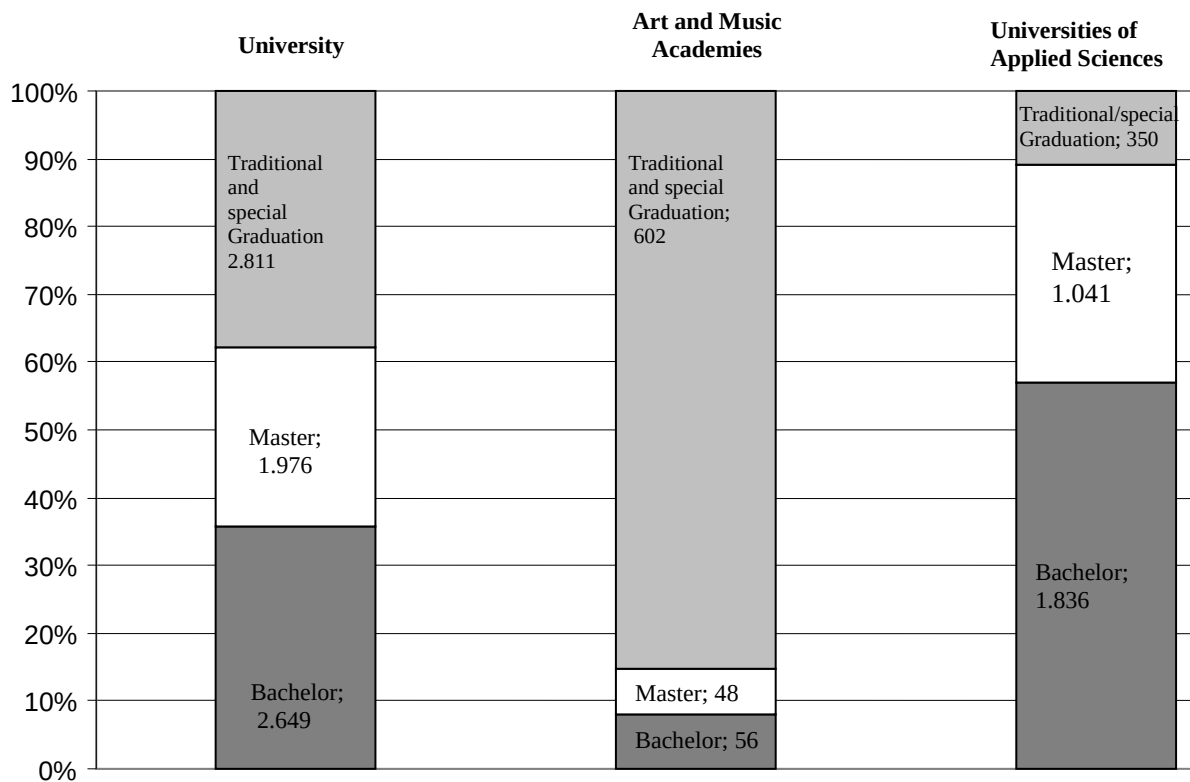


Fig. 1. Bachelor and Master study courses at the different kinds of universities 2008
(source: HRK-Hochschulkompass, 01.03.2008 (SoSe 2008))

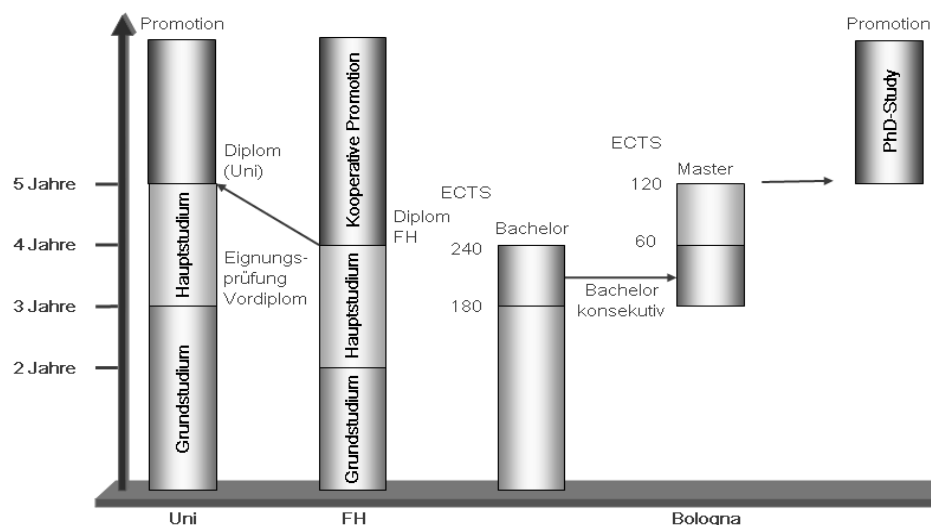


Fig. 2: The academic calendar

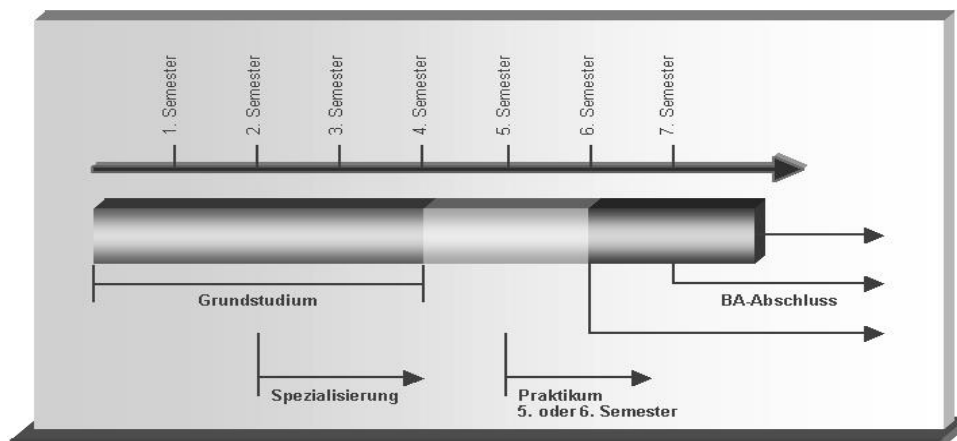


Fig. 3. Possible versions of Bachelor study

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ЛОГИЧЕСКОЙ ПОШАГОВОЙ ПРОГРАММЫ ПУСКА ПГУ-450

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены актуальные вопросы оптимизации пусковых режимов энергоблоков с ПГУ, связанные с разработкой логических пошаговых программ управления пусками. Предложены критерии оптимизации алгоритма логической пошаговой программы управления функциональной группой оборудования, сводящие к минимуму суммарную длительность пуска ПГУ в целом при соблюдении необходимых технологических ограничений и учитывающие суммарные затраты за период пуска.

1. ВВЕДЕНИЕ

В соответствии со стратегией развития энергетики в РФ и с Концепцией технической политики РАО «ЕЭС России» до 2009 года приоритетным направлением в строительстве новых энергетических объектов стали бинарные парогазовые установки большой мощности – 800, 450, 325, 180 МВт [1]. При этом новые энергоблоки ПГУ должны оснащаться полномасштабными автоматизированными системами управления с высокоразвитой диагностикой и высокой степенью автоматизации, как внутренней (взаимосвязь с отдельными технологическими зонами и агрегатами), так и внешней (взаимосвязь с общестанционными системами верхнего уровня и с системами оперативного диспетчерского управления).

Стоимость программно-технических средств и их базового и прикладного программного обеспечения достаточно высока и для их окупаемости в первую очередь необходимо широкое применение в процессе эксплуатации тех функций АСУТП, которые дают наибольший экономический эффект, в числе которых автоматизированные пуски ПГУ из различных тепловых состояний.

В настоящее время процесс закупки оборудования для энергоблоков ТЭС происходит по принципу выбора отдельных элементов комплекса, а задача связать их воедино возлагается на проектные, научно-исследовательские институты и наладочные организации. В логике верхнего уровня АСУ ТП наиболее значимую часть занимают вопросы автоматизации переходных режимов и, в первую очередь, пусковых, причем оборудование различных поставщиков должно работать в едином, непрерыв-

ном процессе и этому следует уделять особое внимание на стадии проектирования.

Сама по себе задача отработки технологии пуска оборудования энергоблока для вновь вводимого в эксплуатацию комплекса является приоритетной, поскольку правильное ведение пускового режима предполагает эксплуатацию оборудования в соответствии с требованиями заводов-изготовителей с обеспечением при этом максимальной эффективности и экономичности его работы.

Автоматизация пусковых процессов не позволяет нарушать эти требования и правила.

2. ОСНОВНЫЕ КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ РЕШЕНИЯ ПО ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИИ ПУСКОВЫХ РЕЖИМОВ

Разработке логических программ управления должна предшествовать оптимальная технология ведения режимов пуска оборудования, определен порядок ввода оборудования в работу с соблюдением всех требований и критериев надежности согласно условиям его эксплуатации. В этой связи на энергоблоках ПГУ-450 реализована определенная концепция технологии пуска основного и вспомогательного оборудования [4].

Пуски блока ПГУ-450 могут осуществляться по различным технологическим схемам, определяемым исходным тепловым состоянием пускаемого оборудования (холодное, неостывшее, горячее) и составом пускаемого оборудования (полный или неполный состав блока).

Как показали результаты режимных испытаний и проведенных расчетных обоснований основных критериев надежности элементов тепловой схемы, пуски энергоблока ПГУ-450 Северо-Западной ТЭЦ и Калининградской ТЭЦ-2 из всех типовых тепловых состояний должны осуществляться на сниженных параметрах пара высокого давления по технологической схеме последовательного пуска:

$$\text{ГТ1} + \text{КУ1} \rightarrow \text{ПТ} \rightarrow \text{ГТ2} + \text{КУ2} \rightarrow \text{ГТ1} + \text{ГТ2} + \text{ПТ}$$

Такая технологическая последовательность пусковых режимов позволяет одновременно унифицировать ее для любых бинарных ПГУ.

Применение технологии последовательного пуска блока предполагает наличие следующих этапов:

I этап — последовательное заполнение конденсатно-питательного тракта и подготовка котла-утилизатора к работе;

II этап — пуск, синхронизация и нагружение ГТУ до нагрузки, необходимой для прогрева паропроводов контура высокого давления в зависимости от теплового состояния паропроводов и металла паровпуска ЦВД паровой турбины;

III этап — разворот, синхронизация и нагружение паровой турбины;

IV этап — нагружение энергоблока до уровня заданной диспетчерским графиком нагрузки.

Для работы любой логической пошаговой программы управления оборудованием должны быть созданы технологические условия начала ее работы. Технологические условия начала работы программы должны соответствовать точному моменту её включения в работу и однозначно их определять. Если такие условия созданы, программа может включиться в работу автоматически и (или) по разрешению оператора.

3. ОБЩАЯ СТРУКТУРА ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРУППОВОГО УПРАВЛЕНИЯ ПУСКОМ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГОБЛОКА

Упрощенная структура логического управления пуском энергоблока ПГУ-450 приведена на рис. 1. На упрощенной структурной схеме изображены основные логические программы верхнего уровня, объединенные общей технологической последовательностью. Основная часть логических программ представляет собой пошаговые логические программы.

Логика управления ГТУ и регулятор мощности блока представляют собой сложные системы автоматического регулирования с автоматически изменяемым заданием, развитой системой диагностики состояния оборудования и, как следствие — развитой системой технологических ограничений (внутренних блокировок).

На упрощенной структурной схеме блочный координатор, как отдельно выделенный элемент, отсутствует. Однако его функции определены взаимосвязями между отдельными логическими программами структурной схемы. Горизонтальные связи указывают последовательность включения логических программ при наличии технологических и организационных

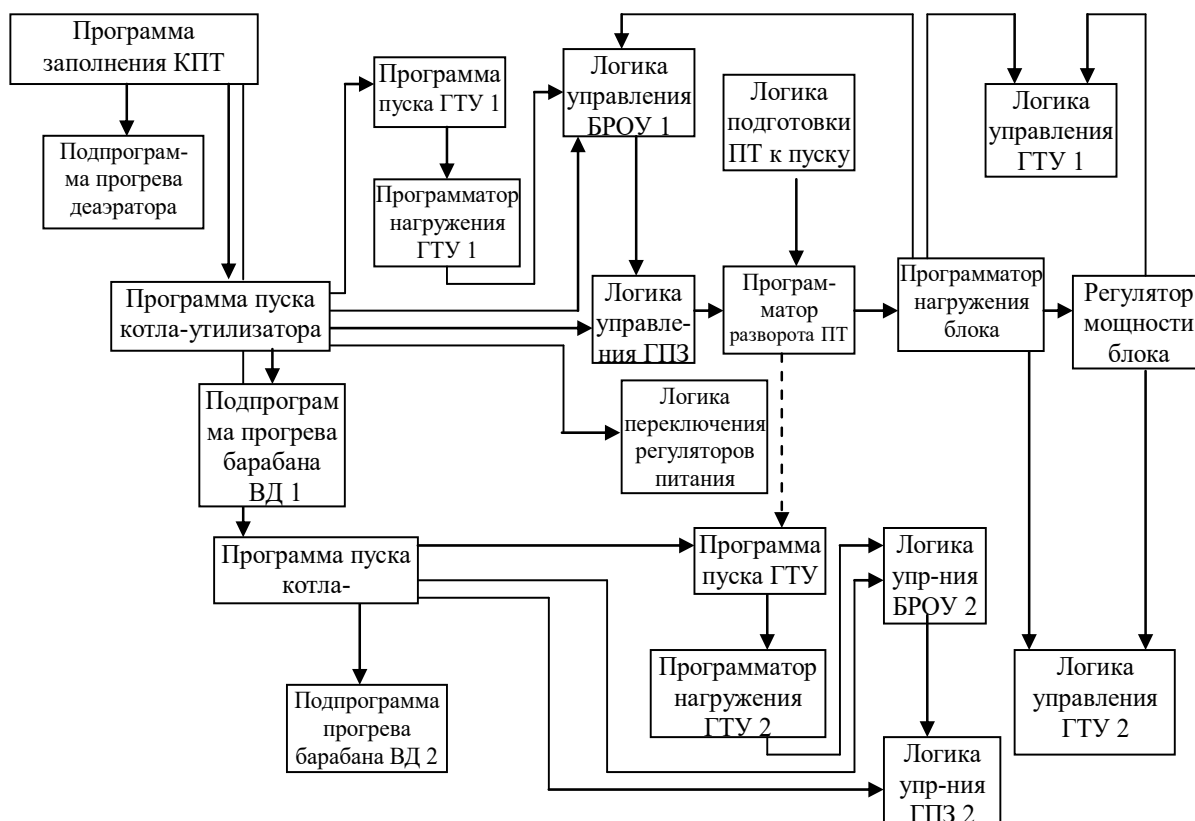


Рис. 1. Упрощенная структура логического управления пуском энергоблока ПГУ-450.

условий на их автоматический ввод в работу. Вертикальные связи указывают взаимодействие логических программ между собой.

Следует отметить, что некоторые пошаговые логические программы могут автоматически останавливаться для выполнения оперативным персоналом ручных операций. В основном ручные операции проводятся на подготовительных этапах заполнения технологических трактов средой (открытие и закрытие ремонтной арматуры, открытие и закрытие воздушников, анализ проб и т.п.). Ручные операции предусматриваются также и на работающем оборудовании, например, при развороте паровой турбины обязательным требованием в связи с жестким регламентом инструкции по эксплуатации является «прослушивание» агрегата на фиксированных значениях (500 об/мин и 1200 об/мин) скорости вращения ротора паровой турбины.

После выполнения ручных операций логическая пошаговая программа может продолжать реализацию алгоритма после разрешения на то оператора.

4. ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ЛОГИЧЕСКОЙ ПОШАГОВОЙ ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ГРУППОЙ ОБОРУДОВАНИЯ

Принципиально, задачу выбора оптимальной технологии пуска ПГУ можно сформулировать, как изменение состояния основного и вспомогательного оборудования энергоблока от заданного исходного состояния [в зависимости от совокупности исходных параметров y_{ij}^0 ($i = 1, 2, \dots, n$ — число управляемых параметров j -го элемента ПГУ; $j = 1, 2, \dots, G$)] в требуемое, определяемое конечными (заданными) значениями этих же параметров y_{ij}^H с целью обеспечения минимального расхода основных ресурсов (минимальные затраты топлива, воды, тепла, электроэнергии на собственные нужды и т.д.) на весь период пуска.

Суммарные затраты за период пуска представим в виде:

$$S_n(\tau_n) = S_B(\tau_n) + S_3(\tau_n) + S_d(\tau_n) + S_G(\tau_n), \quad (1)$$

где: $S_B(\tau_n)$ — стоимость затраченного топлива за период пуска (или стоимость потерь топлива); $S_3(\tau_n)$ — стоимость электроэнергии на собственные нужды; $S_d(\tau_n)$ — стоимость стороннего пара, использованного в период пуска ПГУ; $S_G(\tau_n)$ — стоимость средств на подготовку химочищенной воды и на сбрасываемый в БЗК конденсат.

Если представить процесс пуска ПГУ как последовательность пусковых этапов k составных элементов ПГУ (подготовительные операции, пуск

ГТ и т.д.) (см. п.2), то функцию затрат (1) можно сформулировать в следующем виде:

$$S_n(\tau_n) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \left[C_T \int_{\tau_{l1}}^{\tau_{l2}} B_{kl}^{\Gamma T} d\tau - C_3 \int_{\tau_{l1}}^{\tau_{l2}} (\Theta^{\Gamma T} + \Theta^{\Pi T})_{kl} d\tau \right] + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L C_3^{c.n} \int_{\tau_{l1}}^{\tau_{l2}} N_{kl}^{\Sigma c.n} d\tau + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L C_d^{c.n} \int_{\tau_{l1}}^{\tau_{l2}} D_{kl}^{CT} d\tau + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \left(C_{x.B} \int_{\tau_{l1}}^{\tau_{l2}} G_{x.B} d\tau + C_K \int_{\tau_{l1}}^{\tau_{l2}} G_K d\tau \right), \quad (2)$$

где: $k = 1, 2, \dots, K$ — число этапов пуска ПГУ; $l = 1, 2, \dots, L$ — число операций на k -м этапе пуска; $C_T, C_3, C_3^{c.n}, C_d, C_{x.B}, C_K$ — удельные стоимости соответственно топлива, выработанной ПГУ электроэнергии (тариф отпущенной энергии), электроэнергии на собственные нужды, стороннего пара, химически очищенной воды и сбрасываемого загрязненного конденсата; $B_{kl}^{\Gamma T}$ — функция расхода топлива (газа) на газовой турбине при проведении l -й операции пуска k -го этапа; $\Theta^{\Gamma T}, \Theta^{\Pi T}$ — функции отпуска (выработки) электроэнергии газовой и паровой турбиной, соответственно; $N_{c.n}$ — функция затрат электроэнергии на собственные нужды; D^{CT} — функция затрат стороннего пара; $G_{x.B}, G_K$ — функции, определяющие величины подготовленной химически очищенной воды и потерь конденсата.

Анализ подынтегральных функциональных зависимостей в выражении (2) показывает, что эти зависимости носят линейный или кусочно-линейный характер и постоянны во времени для отдельных этапов или операций пуска. В этих условиях минимум затрат $S_n(\tau_n)$ будет соответствовать минимуму суммарной длительности пусковых операций.

Каждый этап пуска в соответствии со схемой рис. 1. представляет собой совокупность пусковых операций, цель которых — перевести заданную технологическую зону (технологический агрегат или технологический узел) из определенного известного исходного состояния в требуемое конечное состояние, при этом конечное состояние предыдущего этапа является заданным исходным состоянием для последующего этапа пуска.

При такой постановке задачи функцию затрат (2) можно представить в виде:

$$\tau_n = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \tau_{kl} (y_{kij}^0, y_{kij}^H) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где: $l = 1, 2, \dots, L$ — совокупность операций на k -м этапе пуска; y_{kij}^0, y_{kij}^H — начальное и конечное значение i -го управляемого параметра j -го элемента блока на k -м этапе пуска.

Принимаем, что обязательным условием перехода на выполнение $(k + 1)$ этапа пуска является выполнение на выходе из k -го этапа условия

$$y_{kij}^H = y_{(k+1)ij}^0, \quad (4)$$

что означает функциональную зависимость τ_{kl} от параметров y_{kij}^0 и y_{kij}^H и независимость функций τ_k между собой.

В этих условиях из известных математических методов оптимального управления наиболее приемлемым для выбора оптимального алгоритма управления пуском является принцип Беллмана (метод динамического программирования), в соответствии с которым пошаговая оптимизация проводится в следующей последовательности:

первый шаг $k = 1$:

$$\tau_{n1} = \sum_{l=1}^{L_1} \tau_{1l}(y_{1ij}^0, y_{1ij}^H) \rightarrow \min, \quad (5)$$

второй шаг $k = 2$:

$$\tau_{n1,2} = \left\{ \left[\sum_{l=1}^{L_1} \tau_{1l}(y_{1ij}^0, y_{1ij}^H) \right]_{\min} + \sum_{l=1}^{L_2} \tau_{2l}(y_{2ij}^0, y_{2ij}^H) \right\} \rightarrow \min, \quad (6)$$

и т.д.

При $k = K$:

$$\tau_{n1,K} = \left\{ (\tau_{n1,K-1})_{\min} + \sum_{l=1}^{L_K} \tau_{Kl}(y_{Kij}^0, y_{Kij}^H) \right\} \rightarrow \min. \quad (7)$$

На каждом k -м этапе оптимизации учитываются следующие ограничения, накладываемые на y_{ij} :

- по условию «безопасности»

$$y_{ij}^{\min} \leq \bar{y}_{kij}(\tau_{nk}) \leq y_{ij}^{\max}; \quad (8)$$

- по условию градиента скорости изменения управляемого параметра

$$\left(\frac{|\Delta y|}{\Delta \tau} \right)_{kij} \leq \beta_{ij} \cdot \left| \Delta y_{ij}^H \right|_k; \quad (9)$$

- по условию реализуемости и безопасности управления

$$u_{ij}^{\min} \leq \bar{u}_k \leq u_{ij}^{\max}. \quad (10)$$

В (8 — 10) приняты следующие обозначения:

$\bar{y}_{ijk}(\tau_{nk})$ — текущее значение управляемого параметра y_{ij} на k -м подэтапе пуска (при автоматизированном пуске на базе АСУ ТП с ПТК ограничения типа (10) заложены в алгоритмы пусковых операций); $y_{ij}^{\min}$ и $y_{ij}^{\max}$ — минимальное и максимальное допустимое значение параметра y_{ij} по техническим усло-

виям эксплуатации; $\left(\frac{|\Delta y|}{\Delta \tau} \right)_{kij}$ — градиент скорости

изменения управляемого параметра y_{ij} на k -м этапе пуска; $\left| \Delta y_{ij}^H \right|_k$ — допустимая по техническим усло-

виям скорость изменения параметра y_{ij} на k -м этапе пуска; $\beta_{ij} \leq 1$ — алгоритмически определяемый (по экспертным оценкам или оцениваемый по результатам наладочных испытаний) коэффициент ограничения

градиента скорости изменения управляемого параметра.

При $\beta = 1$ минимальное время реализации k -го этапа пуска соответствует условию:

$$\left(\frac{|\Delta y|}{\Delta \tau} \right)_{kij} = \overline{\Delta y_{kij}^H}, \quad \text{т.е.} \quad \Delta \tau_{\min k} = \frac{|\Delta y|_{kij}}{\overline{\Delta y_{kij}^H}}. \quad (11)$$

Это означает, что скорость изменения параметра y_{ij} соответствует максимально допустимой на данном этапе пуска, что в условиях наличия внешних и внутренних неуправляемых возмущений является практически невыполнимым условием.

Таким образом, оптимальная длительность каждого k -го этапа пуска будет зависеть от правильного выбора параметра y_{ij} , имеющего наименьшую допустимую скорость изменения его градиента и правильной оценки значения коэффициента β_{ij} , т.е.

$$\tau_k^* = \left[\left(\frac{|\Delta y_{ij}|}{\Delta y_{ij}^H} \right)_{\max} \cdot \frac{1}{\beta_{ij}^*} \right], \quad (12)$$

где: $\left(\frac{|\Delta y_{ij}|}{\Delta y_{ij}^H} \right)_{\max}$ — максимальное значение искомого

параметра $|\Delta y_{ij}| / \Delta y_{ij}^H$ на всей совокупности управляемых параметров y_{ij} ; β_{ij}^* — расчетное значение коэффициента β для выбранного параметра управления.

Временной критерий (12) — получен для непрерывных динамических процессов. Анализ пусковых процессов показывает, что на каждом этапе пуска присутствует значительное число логических и дискретных операций (в том числе ручных), накладывающих на процесс пуска определенные условия и ограничения. Очевидно, что они, как правило, увеличивают длительность пусковых операций.

При разработке программ автоматизированного пуска по алгоритму (5 — 7) на каждом k -м шаге пуска (при $k > 1$) совместное решение подзадачи

$$\tau_{n k, k+1} = [\tau_{n k, \min} + \tau_{n (k+1)}]_{\min} \quad (13)$$

требует при необходимости пересмотра результатов, полученных на k -м этапе оптимизации с целью обеспечения необходимых условий выполнения всех пусковых операций на $(k + 1)$ этапе. Так например, для толчка и разворота паровой турбины параметры пара перед турбиной должны иметь строго определенные величины (так называемые «предпусковые» параметры пара) в зависимости от теплового состояния паровпуска ЦВД. Если же окончание предыдущего этапа пуска (пуск первого котла КУ1) контролируется, например, по скорости изменения разности температур верха и низа металла барабана высокого давления КУ1, то после обеспечения условий прогрева металла барабана условие по величине температуры и давлению пара, не-

обходимые для последующего пуска паровой турбины, могут быть не обеспечены.

При наличии аналогичных ситуаций выполнение условия (13) требует пересмотра результатов оптимизации k -го этапа пуска. В таком случае, помимо вышеприведенных условий (8 — 10), добавляется новое условие

$$y_{k,m}^n \geq y_{(k+1),m}^0, \quad (14)$$

где: $y_{(k+1),m}^0$ — требуемое значение m i -го параметра в начале $(k+1)$ -го этапа; $y_{k,m}^n$ — значение этого же параметра в конце k -го этапа пуска (знак $>$ или $=$ определяется техническими условиями пуска оборудования ПГУ).

Таким образом, совместное выполнение условий (8) — (10) и (14) по всем этапам пуска и выбор оптимальных значений β_{ij} обеспечивают достижение оптимальной суммарной длительности пуска ПГУ в целом.

Выбор параметра β_{ij} производится при проведении наладочных испытаний с целью отработки и оптимизации алгоритма автоматизированного пуска и уточняется в ходе эксплуатации.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фирмой ОРГРЭС совместно с ОАО «ВТИ», ЗАО «Интеравтоматика», персоналом Северо-Западной ТЭЦ и Калининградской ТЭЦ-2 проведены практические исследования работоспособности алгоритмов пошаговых программ верхнего уровня. Впервые в России получены положительные результаты внедрения в производство программ логического управления основным и вспомогательным оборудованием энергоблока ПГУ-450, включая взаимосвязи основных логических программ. Внедрение логических пошаговых программ управления функциональными группами оборудования позволило обеспечить непрерывность технологического процесса пуска, нагружения и вывода на номинальные (или заданные) технологические параметры, исключая возможные ошибки персонала, и, как следствие, — повышение экономичности парогазовой установки в целом.

Полученные результаты выполненной работы, безусловно, имеют огромную важность. Коллективу специалистов, участвовавшем в подготовке и проведении испытаний, удалось реализовать множество технических предложений и тем самым решить поставленные задачи по автоматизации пуска ПГУ. Вместе с тем коллектив разработчиков считает, что работы по оптимизации логических программ следует продолжать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Концепция** технической политики ОАО РАО «ЕЭС России», Москва, 2005 г.
2. **Некоторые** особенности режимов эксплуатации головного энергоблока ПГУ-450Т / Р.И. Костюк, И.Н. Писковацков, А.В. Чугин и др. // Теплоэнергетика. 1999. №9.
3. **Невзгодин В.С., Аристархова И.В.** Опыт организа-

ции пусконаладочных работ при внедрении АСУ ТП энергоблока ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ // Тепловые электрические станции. 2003. №5.

4. **Опыт** внедрения технологических функций АСУ ТП на энергоблоке ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ / В.С. Невзгодин, И.В. Аристархова, С.А. Мартюк, В.А. Биленко // Тепловые электрические станции. 2003. №5.
5. **Невзгодин В.С., Радин Ю.А., Панько М.А.** Алгоритмические основы автоматизации пуска парогазовых установок большой мощности // Теплоэнергетика. 2007. №10.

РАЗВИТИЕ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ СОЗДАНИЯ МАЛЫХ ТЭС

АВЕРИНА Т.А.

ПРЕДМЕТ РАЗРАБОТКИ

РАЗРАБОТКА ТИПОВЫХ ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОЦЕНКИ, ПОДГОТОВКИ И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛЫХ ТЭС.

АКТУАЛЬНОСТЬ

АКТУАЛЬНОЙ ЗАДАЧЕЙ, ПОСТАВЛЕННОЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СТРАТЕГИИ РФ, ЯВЛЯЕТСЯ ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ ЭКОНОМИКИ, В ЧАСТНОСТИ ЗА СЧЁТ РАЗВИТИЯ МАЛОЙ/РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, ОРИЕНТИРОВАННОЙ НА МЕСТНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВ. СТИМУЛИРУЮЩИМ ФАКТОРОМ В РАЗВИТИИ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ, АВТОГЕНЕРАЦИИ ДОЛЖЕН СТАТЬ ОЖИДАЕМЫЙ РОСТ СТОИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ОРЭ, ВЫЗВАННЫЙ КАК РОСТОМ СТОИМОСТИ БАЗОВЫХ ПЕРВИЧНЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ, ТАК И НЕОБХОДИМОСТЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОКУПАЕМОСТИ СОЗДАВАЕМЫХ СОГЛАСНО ГОЭЛРО-2 ЭНЕРГООБЪЕКТОВ. РАЗВИТИЕ МАЛОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ПРИВЕДЁТ К СУЩЕСТВЕННОМУ РОСТУ ЧИСЛА ЭКОНОМИЧЕСКИХ СУБЪЕКТОВ, ТАК ИЛИ ИНАЧЕ ВОВЛЕЧЁННЫХ В ПРОЦЕСС СОЗДАНИЯ ЭНЕРГОМОЩНОСТЕЙ.

НЕОБХОДИМОСТЬ РЕШАТЬ ПОСТАВЛЕННУЮ ЗАДАЧУ СОЗДАЁТ ПОТРЕБНОСТЬ В ТИПОВЫХ МОДЕЛЯХ, ПОЗВОЛЯЮЩИХ ОРГАНИЗОВАТЬ ЭФФЕКТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ СОЗДАНИЯ МАЛЫХ ТЭС.

ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С 2006 ГОДА В РАМКАХ РЕАЛИЗАЦИИ НАСТОЯЩЕГО ПРОЕКТА БЫЛИ РАЗРАБОТАНЫ:

- ✓ ТИПОВАЯ МОДЕЛЬ, ОПИСЫВАЮЩАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ/ВЗАИМОСВЯЗЬ ДЕЙСТВИЙ И СОСТАВ НЕОБХОДИМЫХ ДОКУМЕНТОВ ПО ПОДГОТОВКЕ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ТЭС, В ТОМ ЧИСЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОЕКТНОГО ФИНАНСИРОВАНИЯ. МОДЕЛЬ РАЗРАБОТАНА С УЧЁТОМ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА – ЗЕМЕЛЬНОГО, ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОГО И ВОДНОГО КОДЕКСОВ, ФЗ «ОБ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ», ПОСТАНОВЛЕНИЙ ПРАВИТЕЛЬСТВА О ПРАВИЛАХ ОРЭ, РРЭ, ДОСТУПЕ К УСЛУГАМ ЕСТЕСТВЕННЫХ МОНОПОЛИЙ И Т.Д.
- ✓ СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВОМ МАЛЫХ ТЭС МОЩНОСТЬЮ ДО 50 МВт НА БАЗЕ ГТУ/ГПУ ВКЛЮЧАЮЩИЕ:

- ДЕТАЛЬНЫЕ КАЛЕНДАРНО-СЕТЕВЫЕ ПЛАНЫ СОЗДАНИЯ ТЭС В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ PRIMAVERA PROJECT MANAGEMENT;
- СИСТЕМУ РЕГЛАМЕНТОВ, ИНСТРУКЦИЙ ПО УПРАВЛЕНИЮ ПРОЕКТОМ, ОРГАНИЗАЦИОННОМУ УСТРОЙСТВУ.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Исходя из состава актуальных задач, перспективными направлениями развития проекта являются:

- ✓ СТРУКТУРИРОВАНИЕ И ДОРАБОТКА РАНЕЕ ВЫПОЛНЕННЫХ РАЗРАБОТОК В ФОРМЕ ТИПОВОГО КЕЙСА/CD, ВКЛЮЧАЮЩЕГО МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ/ДЕЙСТВИЙ ПО ПОДГОТОВКЕ СТРОИТЕЛЬСТВА МАЛОЙ ТЭС НА БАЗЕ ГТУ/ГПУ, ШАБЛОНЫ ТИПОВЫХ ДОКУМЕНТОВ, ГРАФИКОВ/ПЛАНОВ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИЙ В СОЗДАНИЕ МАЛОЙ ТЭС В EXCEL, ПРИМЕРЫ БАЗОВЫХ КОМПОНОВОЧНЫХ И ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ.
- ✓ РАЗРАБОТКА ДЛЯ ПРЕДСТАВИТЕЛЕЙ БИЗНЕСА И СТУДЕНТОВ ПРОФИЛЬНЫХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ ВАРИАНТОВ УЧЕБНОГО КУРСА «УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТОМ СОЗДАНИЯ ТЭС – ОТ БИЗНЕС-ИДЕИ ДО ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ».

ПЕРЕВОД УГОЛЬНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА НОВУЮ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИННОВАЦИИ С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ПОЛНОЙ БЕЗОТХОДНОСТИ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

АННОТАЦИЯ

В статье дано краткое описание установки, основой которой является газификация твердого топлива в шлаковом расплаве. Установка, обеспечивающая многоцелевое безотходное экологически чистое использование угля.

Определены первоочередные задачи, которые необходимо решить при разработке АСУТП данной установки.

Если XX столетие ознаменовалось бурным развитием атомной энергетики и ряда других наукоемких и инновационных технологий, то в одной из определяющих отраслей промышленного производства, а именно тепловой энергетике, использующей твердое топливо, практически не было технологических прорывов. Все усилия направлялись на улучшение качества сжигания твердого топлива, как чисто энергетического сырья, и перевода котлоагрегатов на сжигание более экологически чистого топлива - газа.

Рост стоимости газа в РФ до уровня европейских цен является устойчивой экономической предпосылкой увеличения использования угля для производства электроэнергии. Несоответствие стоимости угля и природного газа в России их энергетической ценности неминуемо приведет к повышению стоимости природного газа и возрастанию доли угля в производстве электроэнергии в ближайшей, средней и далекой перспективе.

Из всех видов органических топлив уголь является наиболее сложной смесью большого числа химических соединений. Химический состав золы на бессульфатную массу, например, для Донецкого бассейна характеризуется следующими показателями: SiO₂-43-53%, Al₂O₃-21-28%, Fe₂O₃-13-27%, CaO-2-4%, MgO-0,9-1,7%, K₂O-4%, Na₂O 0,8-1,6%, TiO₂-0,4-1,0%. В некоторых месторождениях Канско-Ачинского бассейна содержание в золе CaO достигает 60,0%, а в отдельных месторождениях Донецкого бассейна содержание в золе Fe₂O₃ равно ~40%. В золе углей в количествах, представляющих практический интерес, содержится алюминий, кремний, оксиды железа и кальция, а также более 50 редких и цветных металлов.

Хорошо известно, что для большинства марок углей в процессе эксплуатации шахт и разрезов наблюдается ухудшение их качества в большом диапазоне. Значительные скачки в изменении качества углей существенно отражаются на надежности

и экономичности действующих электростанций. Приходится использовать предварительное шихтование твердого топлива, полностью изменять режим работы пылесистем, устройства шлакоудаления и золоочистки. Исследования котлов с жидким шлакоудалением и с циклонными предтопками показали, что нестабильность качества углей приводит к зашлаковке леток и долгосрочным остановкам котлов.

Необходимость обеспечения удовлетворения энергетических потребностей с наилучшими экономическими и экологическими показателями требует разработки и внедрения оптимальной стратегии развития угольной электроэнергетики на длительный период.

Концепция развития угольной электроэнергетики должна заключаться в обеспечении комплексного использования твердого топлива, включая не только органическую, но и всю минеральную часть. Одним из наиболее перспективных вариантов является инновационная многоцелевая, безотходная, энергосберегающая и экологически чистая технология газификации твердого топлива любого качества в барботируемом парокислородным дутьем шлаковом расплаве. Газификация угля любых марок и качества в шлаковом расплаве совмещает одновременно такие технологические и трудоемкие процессы как обогащение и шихтование угля, его дробление, очистку газов от пыли и оксидов азота и серы технологическим путем и переработку твердых отходов в полезную товарную продукцию.

Всем без исключения применяемым до настоящего времени в мировой практике традиционным технологиям сжигания твердого топлива, включая, технологии с кипящим, циркулирующим и другими способами сжигания угля, несмотря на их разнообразие и внешние технологические отличия сопутствует накопление миллионов тонн выбросов в виде породы, шлама, золы и шлака. После добычи угля в шахте и подачи на поверхность (гора) часть его «негорючей» (минеральной) массы складывается в терриконах (до 30%), а остальной уголь направляется на обогатительные фабрики и только после обогащения и удаления шлама (15%) попадает на электростанцию, что составляет около 50% по массе добытого на шахте первичного продукта. В процессе сжигания на золошлакоотвалах электростанций захороняется еще около 20% минеральной части твердого топлива.

Таким образом, все без исключения существующие угольные технологии сжигания твердого

топлива, основанные на принципе одноцелевого использования угля, оснащаются специальными дорогостоящими системами, обеспечивающими «очистку» угля от минеральной составляющей, и как следствие, им присущи существенные недостатки, заключающиеся в:

- потребности предварительного обогащения углей с выделением дополнительных существенных инвестиций в угледобывающую отрасль;

- необходимости установки дорогостоящих и громоздких систем топливо-и пылеприготовления и пылеподачи;

- обязательностью устройства громоздких мест захоронения млн.т твердых, илистых и жидких отходов, т.е. организации системы золошлакоудаления и строительства золошлакоотвалов;

- потребности строительства дорогостоящих систем очистки уходящих газов от пыли, оксидов серы и азота.

В противовес одноцелевому использованию угля в электроэнергетике основной отличительной особенностью многоцелевого использования угля в установках с шлаковым расплавом является подача всего без исключения добытого на шахте рядового твердого топлива на электростанцию. Фактически используется система, работающая по принципу шахта-электростанция. При этом «электростанция» становится комплексным предприятием, удовлетворяющим потребности разнообразных потребителей, кроме электроэнергии, тепла и пара покрываются потребности, связанные со строительной продукцией (строительные блоки, шлакоситалл, щебень и др.), полиметаллического сырья, азота и аргона.

Суть технологии заключается в организации процесса газификации угля в объеме собственного жидкого шлака, который барботируется обогащенным кислородом и паром дутьем (рис.1). Процесс реализуется в специальной камере-газификаторе, являющейся составной частью энергетического котла-утилизатора. Уголь в расплав попадает без какой-либо предварительной подготовки. Термическое дробление (подготовка) топлива и окислителя, а также обогащение топлива, заключающееся в выделении чистого свободного углерода на поверхности расплава, осуществляется в процессе газификации в турбулентноперемешивающейся эмульсии топлива, «растворителя», роль которого играет известняк, дутья и шлака. При этом жидкий шлак является теплоносителем. Технологически парокислородосодержащее дутье вводится под избыточным давлением в расплав шлака, энергично перемешивает его, в результате чего создается газонасыщенный слой гетерогенного расплава. Содержание нерасплавленного угля в зоне подачи максимальное. В процессе плавления его содержание уменьшается и в конечной зоне достигает нуля. Общая высокая энергоемкость процесса газификации угля в шлаковом расплаве обуславливается большими температурными градиентами в рабочем объеме камеры. Парогазожидкостная шлаковая эмульсия с вязкостью менее 10пуаз при рабочей температуре

1400-1500°C обеспечивает идеальные условия теплообмена и контакта всех компонентов расплава, в том числе части углерода с окислителем. Выделенный в чистой форме и неокислившийся углерод в связи с низким удельным весом всплывает и концентрируется на поверхности расплава, где и осуществляется последующая его газификация.

Технологическая схема газификации угля в шлаковом расплаве состоит из следующих структурных элементов: топливоподачи; котла-утилизатора с камерой-газификатором; воздухо-разделительной (кислородной) станции; системы подготовки и подачи дутья; системы подготовки воды и переработки жидких стоков; системы охлаждения газификатора и подачи газа на его пуск; устройств подготовки и переработки «легкого» шлака в промышленную продукцию (шлакоситалл, шлакощебень, строительные блоки и др.); устройство приема и брикетирования полиметаллических отходов с содержанием 90-95% железа. Благодаря наличию кислородного дутья и поддержанию восстановительной среды в зоне газификации угля при умеренном уровне температур в зоне дожигания генераторного газа выход оксидов азота не превышает 50 - 150мг/нм³. Технология газификации твердого топлива позволяет за счет изменения количества подаваемого известняка регулировать переход сернистых соединений в жидкую фазу (шлаки). При этом концентрация оксидов серы в уходящих газах не превышает 300-400мг/нм³. Основной ступенью очистки дымовых газов от золы является шлаковый расплав, в котором улавливается около 98-99,5% минеральной части топлива. Концентрация летучей золы в уходящих газах не превышает 30мг/нм³. Котел-утилизатор, сжигающий образующийся при газификации угля газ обладает такими преимуществами как малые габариты, отсутствие недопустимой запыленности дымовых газов, низкие выбросы оксидов азота и серы. Объем выбрасываемых дымовых газов котлом-утилизатором на 30-40% меньше, чем в традиционном котле аналогичной мощности, а абсолютные потери тепла с уходящими газами ниже 3%, в то время как на традиционных котлоагрегатах на аналогичных углях они более 7%. Потери тепла с механическим недожогом даже при сжигании низкосортного антрацитового штыба отсутствуют.

В результате межотраслевым аспектом газификации твердого топлива в шлаковом расплаве как способа, обеспечивающего многоцелевое, безотходное экологически чистое использование первичного сырья является:

- для угольной промышленности- полная переработка в товарную продукцию любой горной массы, включая породу, шламы и отвалы;

- для металлургической промышленности- получение дополнительного металлургического сырья для переработки в больших количествах;

- для стройиндустрии и хозяйственных целей- получение высококачественных изделий и строительных материалов, удовлетворение нужд в потребности инертных газов.

Реализация и эффективная надежная работа столь сложной технологической системы в существенной степени зависит от решения проблем управления технологическим комплексом.

Даже очень краткое описание работы установки показывает как разнообразны и сложны протекающие в ней тепловые, физико-химические и гидродинамические процессы, кроме того, имеется большое число рассредоточенных, но взаимосвязанных информационных объектов (как физических, так и виртуальных). Все это предъявляет высокие требования к функциональным и техническим возможностям средств автоматики данного технологического процесса.

Разработка АСУ ТП такого сложного технологического комплекса усложнена тем, что должна выполняться параллельно с проектированием самой установки. Поэтому при разработке АСУТП предлагается последовательное использование современной объектно-компоновочной технологии, т.е. технологии от «описания объекта к алгоритмам контроля и управления» с последующей привязкой подготовленной системы к программно-техническим средствам.

В этих условиях особое значение приобретает задача математического моделирования динамики процессов и, в особенности, - тепловых процессов в структурных элементах технологической цепочки газификации угля в шлаковом расплаве, особенно в котле-утилизаторе и камере-газификаторе; - физико-химических процессов взаимодействия фаз (металл, шлак, газ и др.) в камере-газификаторе; - гидродинамических процессы массопереноса и перемешивания фаз в котле-утилизаторе и камере-газификаторе и т.д.

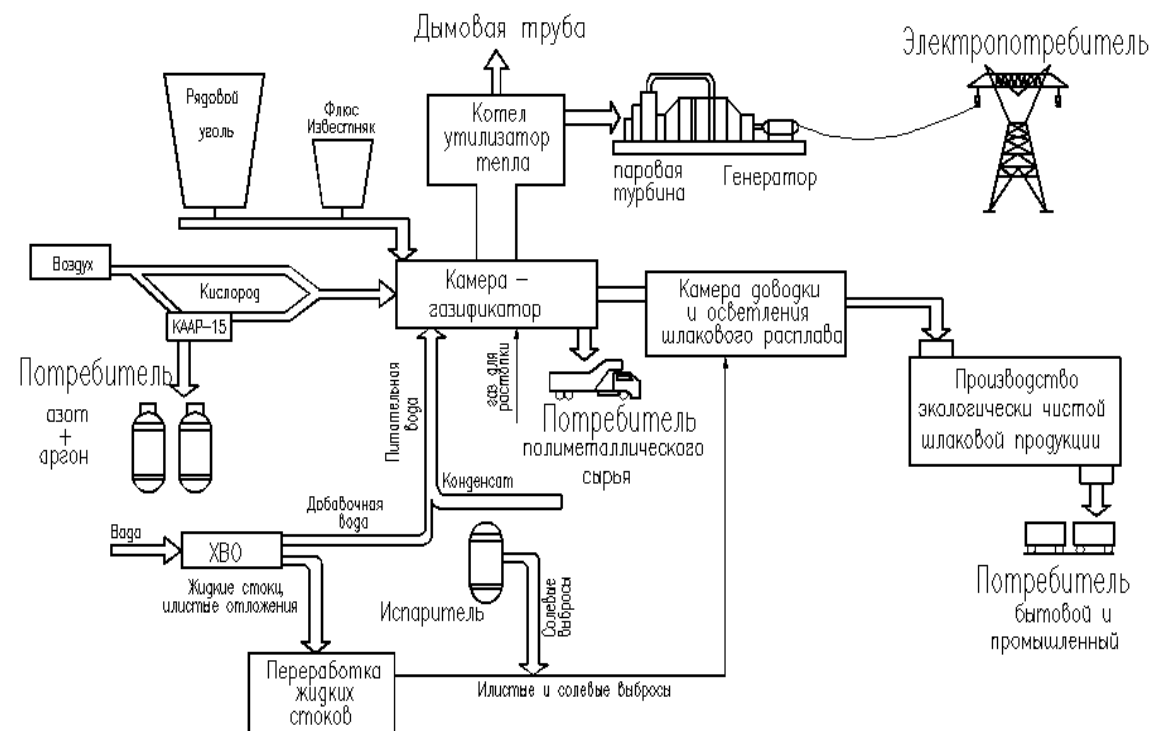
Для разработки математических моделей и самой системы управления необходимо определить технологически обоснованный перечень контролируемых и управляемых переменных, требования к метрологическим характеристикам средств измерений, обеспеченность задач получения информации серийными средствами измерений. К числу проблемных относятся так же задачи контроля режима работы камеры-газификатора, включая непрерывное измерение высоких температур и аналитические измерения и управление потоками угля и флюса.

По условию экономической эффективности комплекс рассчитывается на длительную непрерывную работу. Соответственно, ожидаемая частота пусков и остановов оборудования комплекса не должна быть высокой. Тем не менее, из-за необходимости согласования режимов работы всех процессов во времени должны быть проработаны алгоритмы пусковых операций с высокой степенью автоматизации.

Современные программно-технические средства автоматизации технологических процессов в энергетике обладают широкими функциональными возможностями и при наличии алгоритмов решения информационных и специальных задач управления процессами газификации угля и переработки рас-

плава могут явиться основой для построения эффективной автоматизированной системы управления данным технологическим комплексом. Применение ПТК позволит решить задачи, связанных с большим объемом информации, многосвязностью алгоритмов управления, повышенными требованиями к «живучести» и надежности технологического процесса газификации угля в шлаковом расплаве. Однако, в процессе проектирования комплекса должны приниматься во внимание известные теоретические проблемы «управляемости» и «наблюдаемости», должны быть четко определены цели управления, оптимальная последовательность действий для достижения этих целей и вся необходимая для этого технологическая информация.

Рис. 1. Технологическая схема газификации угля в шлаковом расплаве



Experiences with the Bologna Process at the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz

R. Hampel*, F. Albrecht**

**4th International Scientific and Technical Conference Control 2008
14th – 16th October 2008
Moscow**

Abstract

The paper gives an overview of the European and German Qualification Framework for higher education of the universities as the basis for the realisation of the Bologna Process at the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz.

A brief description will show the results of the learning and teaching processes for the graduates regarding the competences. The definition of the content of the competences is not consistent. At our University we defined three competence fields, specialised knowledge, methods and social competences.

As an instrument for the quality management and also for the creation of the study courses, we use a "Module Database". For the documentation of the education results we prepare the "Diploma Supplement", an international accepted document.

*Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Hampel
Rector, University of Applied Sciences
Zittau/Görlitz
(rektor@hs-zigr.de)

**Prof. Dr. phil. Friedrich Albrecht
Vice Rector of Academic Affairs,
University of Applied Sciences
Zittau/Görlitz
(prorektor-bildung@hs-zigr.de)

1. Introduction

Basis for the establishment of the Bachelor and Master study courses in Germany are the eight levels of the European Qualification Framework (Brussels 2005) and the Qualification Framework of the German University Degrees according to an agreement with the resolution of the Conference of the Ministers of Education 2005. The main aims are:

- Compatibility with the European Qualification Framework
- General description of the Qualification without relation to the specification
- General description of the Qualification without relation to the type of University
- Integration of all relevant group of persons

With help of this is given:

A framework of comparable and compatible university degrees regarding the qualification and the workload, level, learning results, competences and profile

For this it is necessary to check critical:

- the teaching content
- the methods of teaching and learning

This process should be continuous in relation of the state science and technology. This is a specific task for the universities. It's also necessary to make legal requirement in all countries and states which save, that the results of teaching and learning for all students will be accepted in all European countries.

The instruments were developed at the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz for the realisation of the development of the new study course schedules and examination schedules.

- [Module Database](#) for subjects
- System of quality management for the development of study course schedules and examination schedules

2. The European and German Qualification Framework

The European Qualification Framework includes eight levels of qualification. They are described very brief in table 1 (Learning outcomes relevant to level – knowledge).

Not included are the problems of “long life learning” which have an increasing meaning in the near future. That is given for all qualification levels and sciences. The German association if industry discussed the Qualification Framework intensively. The reason for it is the increasing if the lack regarding high qualified and skilled workers and academics.

Table 1 Descriptors defining levels in the European Qualifications Framework (EQF)

	Knowledge
	In the context of EQF, knowledge is described as theoretical and/or factual
Level 1	basic general knowledge
Level 2	basic factual knowledge of a field of work or study
Level 3	knowledge of facts, principles, processes and general concepts, in a field of work or study
Level 4	factual and theoretical knowledge in broad contexts within a field of work or study
Level 5	comprehensive, specialised, factual and theoretical knowledge within a field of work or study and an awareness of the boundaries of that knowledge
Level 6	advanced knowledge of a field of work or study, involving a critical understanding of theories and principles
Level 7	highly specialised knowledge, some of which is at the forefront of knowledge in a field of work or study, as the basis for original thinking and/or research critical awareness of knowledge issues in a field and at the interface between different fields
Level 8	knowledge at the most advanced frontier of a field of work or study and at the interface between fields

The German Qualification Framework is nearly identical to the European Qualification Framework (see enclosure 1). It also includes eight levels with the definition of the basis competencies:

- Specification competence
- Social competence
- Personal competence

The author's opinion is, that important topics were formulated in the position paper of the German industry:

- The German Qualification Framework should include the whole education system with reflection to the action competence.
- The aim is the improvement of the transparency and openness.
- It should include all education parts.
- The principle of voluntary nature should be accepted.
- No new and more bureaucracy
- Description of the education levels with help of descriptors (enclosure 2)

On the basis of the former descriptions we have at the universities in Germany the world wide accepted three level education system:

- Bachelor
- Master
- Doctor degree

If we compare the European Qualification Framework with the proposal of the German industry, we can see that the discussion about the necessary competences is not closed. For the graduated level Bachelor and Master are recommend the competences in summarised in table 2.

	Competences		
	Instrumental	Systematic	Communicative
Bachelor	Using knowledge for activities at work and develop solutions for problems	- collecting, judging and interpreting informations - decisions that can be scientifically explained considering social and ethical knowledge - ability to independently gather knowledge (learning process)	- formulating and explain solutions for problems - information exchange - responsibility with(in?) a team
Master	Using knowledge in new situations in a wide or multi disciplinary relation	- Integrating knowledge (complexity) - decisions (made without/with incomplete informations) that can be scientifically explained considering social and ethical knowledge - acquire knowledge independently - independent research and application-oriented projects	- convey the current status of research and application - information exchange - special responsibility

Table 2: Competences for the graduated level Bachelor and Master (Resolution of the Conference of Ministers of Education, 21.04.2005)

Regarding the study courses for engineers and natural scientists in some countries is discusses about the role of the qualification level "Diploma" (Note: In Germany we have a federalist structure with different laws.). For this it is necessary to take in consideration, that we have three levels of Diploma depended of the kind of university.

Diploma (BA)	-	University of Cooperative Education
Diploma (FH)	-	University of Applied Sciences
Diploma	-	University

In those three levels the study time is different between three and five years. A further problem is the fact, that in the PhD courses more teaching activity is given. The basis of the doctorate is the independent scientific work. The thesis is a contribution for further development of the discipline of science. In this ranch the proof of a higher knowledge and competences in comparison to the level Diploma or Master takes place. The majority of the German Universities and Universities of Applied Sciences follow this principle. New are so called "Graduates Colleges" which are helpful for the support of the independent scientific work. There is no compensation with examinations.

The table 3 and 4 as well as the figure 1 give an actual overview about the process of conversion of the study courses in Germany.

Table 3 Bachelor and Master study courses at different kinds of universities 2008

Kind of university	all study courses	Share			
		Bachelor	Master	Sum	% von insg.
Universities	7.436	2.649	1.976	4.625	62,2
Universities of Art/Music	706	56	48	104	14,7
Universities of Applied Sciences	3.227	1.836	1.041	2.877	89,2
All kinds of universities	11.369	4.541	3.065	7.606	66,9

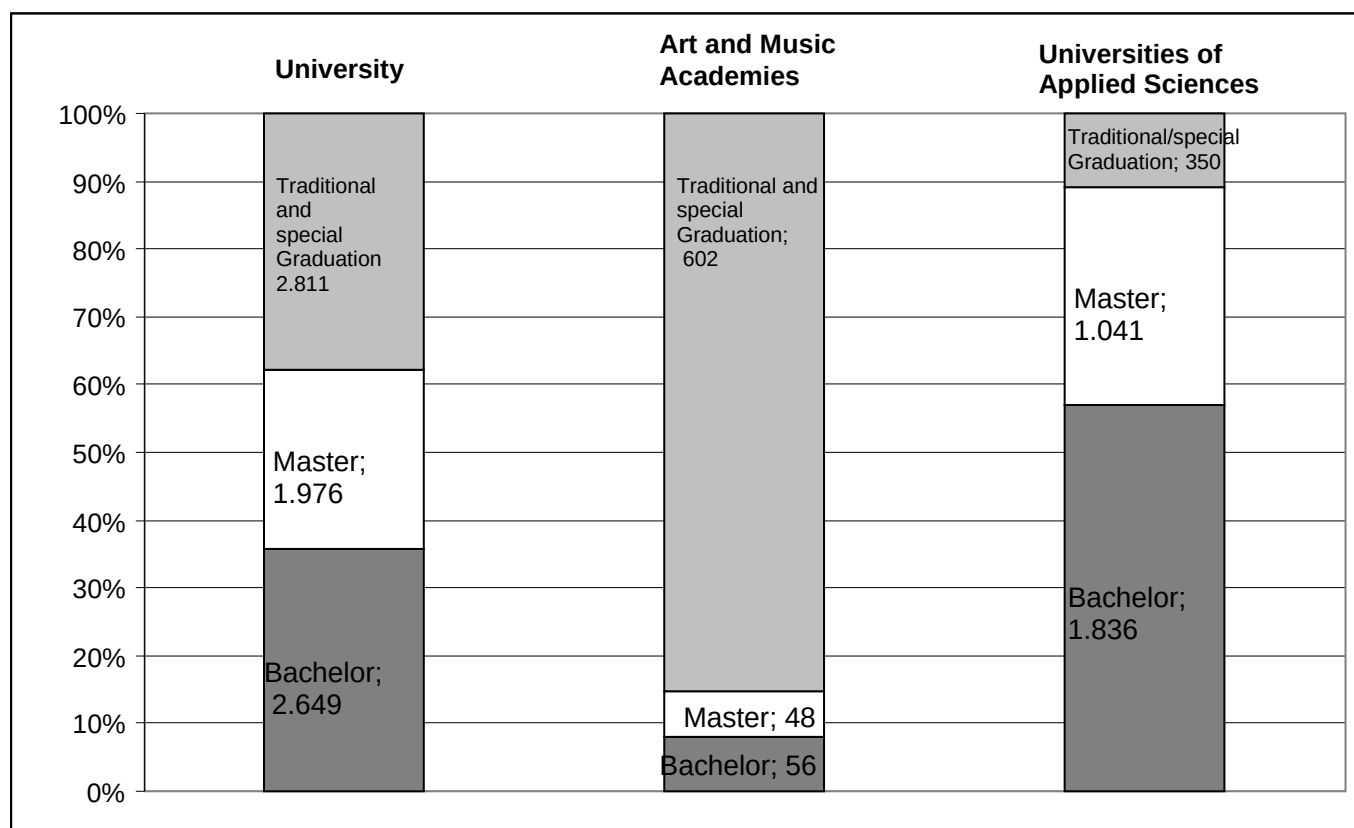
source: HRK-Hochschulkompass, 01.03.2008 (SoSe 2008)

Table 4 Bachelor and Master study courses for different disciplines 2008

Disciplin	all study courses	share			
		BA	MA	sum	%
Agriculture, Forest, Feeding	229	102	93	195	85,2
Medicine, Health	707	254	200	454	64,2
Engineering	2.272	1.141	738	1.879	82,7
Art and Music	1.092	206	107	313	28,7
Mathematics, Natural Science	2.246	971	608	1.579	70,3
Law, Economy, Social Science	2.377	1.033	931	1.964	82,6
Language and Culture	4.593	1.531	760	2.291	49,9
SUM	11.369	4.541	3.065	7.606	66,9

source: HRK-Hochschulkompass, 01.03.2008 (SoSe 2008)

Figure 1 Bachelor and Master study courses at the different kinds of universities 2008



source: HRK-Hochschulkompass, 01.03.2008 (SoSe 2008)

It is clear to see, that the process of conversion the type of study courses is mostly in progress at the University of Applied Sciences.

3. Bachelor and Master study courses at the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz

Figure 2 presents the academic calendars in comparison between Universities, Universities of Applied Sciences and staged study courses according in the Bologna-Process. A significant characteristic is the transition from the division in basic studies and main studies to the staged degrees. For every semester 30 ECTS points (European Transfer Credit System) are assigned. There are two possibilities for the transition of basic studies to main studies:

- Consecutive study course (normally the same term and the same university)
- constructive Master study course

Whereas in consecutive study courses the specialisation (the deepening of knowledge) takes place, constructive master study courses are aligned to expand knowledge (e. g. Business Administration for electrical engineers).

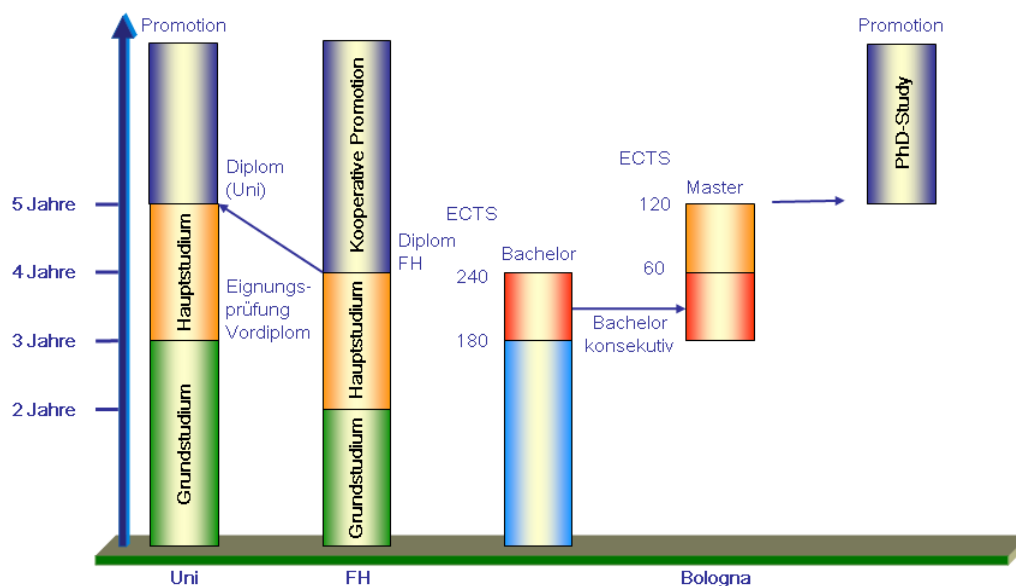


Figure 2: The academic calendar

Figure 3 shows the possible versions of a basic study course. The admission for students who transfer to another university is assured (under the condition that the receiving university approves of the accomplished achievements for the particular degree in the form of ECTS points). For the transition from a Bachelor study course consisting of 6 semester (180 ECTS points) to a Master study course consisting of 2 semester (60 ECTS points) individual regulations within universities are necessary.

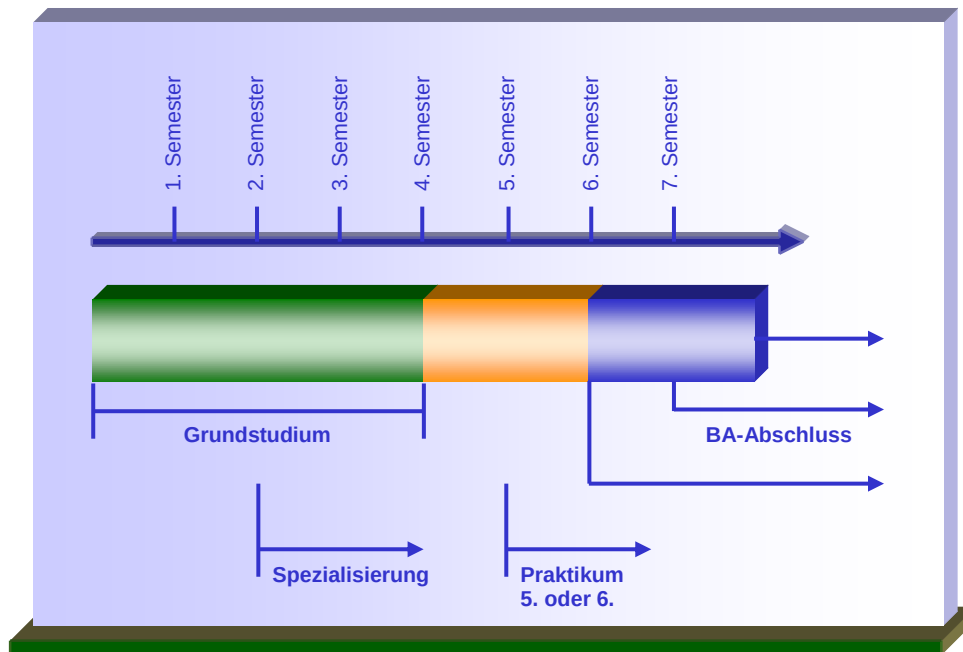


Figure 3: possible versions of Bachelor study courses

The following synonyms are permitted for the classification of Bachelor (B) and Master degrees:

of Arts	B. A.;	M. A.
of Science	B. Sc.;	M. Sc.
of Engineering	B. Eng.;	M. Eng.
of Laws	BLLB;	LLM

Terms for the degrees of non-consecutive and continuative Master study courses are not specified/mandatory.

The faculties of the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz

- Faculty of Languages
- Faculty of Civil Engineering
- Faculty of Electrical and Information Engineering
- Faculty of Computer Science
- Faculty of Mechanical Engineering
- Faculty of Mathematics/Natural Sciences
- Faculty of Applied Social Studies
- Faculty of Economics

offers 31 study courses, which are

- 11 Bachelor study courses
- 7 combined Bachelor/Diploma study courses
- 6 Diploma study courses
- 7 Master study courses

For natural-scientific and engineer-scientific study courses most of the time 7 semesters are planned for the Bachelor's degree because of the required professional qualification. For the consecutive Bachelor/Master study courses the combination of 6 – 4 semesters is realised.

Because of the not yet completely concluded discussion about the classification of the Diploma degree the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz also offers a combination of Bachelor and Diploma study courses.

As a confirmation of the teaching contents and learning contents as well as the acquired competence a „Diploma supplement“ (enclosure 2) is handed over to the graduates along with the report or with a change of university. This Diploma Supplement contains

- Personal data of the holder of the qualification
- Information about the qualification
- Information about the level of the qualification
- Information about the content and the results
- Information about the status of the qualification
- Certification
- Information about the national system of higher education

Module descriptions have a special relevance for the classification of the subjects in the study and examination regulations as well as a proof of the acquired level of qualification (enclosure 3, example of the module „power electronics, electric impulses “). They include:

- chronological placement of the course
- study period
- examinations
- teaching contents
- professional competences
- competences independent from subjects
- necessary and recommended preconditions
- literature

With the purpose to optimise the number of examinations the first semester should be finished with no more than 6 modules and a total of 30 ECTS points. To reach a very good ... and multiple use of the modules, each module should contain 5 ECTS points. The University of Applied Sciences Zittau/Görlitz agreed on integrating „General studies “, „Ecology “ and „Interculturalism“ as well as the foreign language education into the study schedules.

4. Summary

On the basis of the recommendations of the European and German Qualification Framework was introduced at the University of Applied Sciences the new staged education system

The process of conversion is mostly finished (in Germany, for Universities of Applied Sciences 90%). Parallel Bachelor and Diploma study courses are partially still offered, also at the University of Applied Sciences Zittau/Görlitz.

As an important instrument for planning the study courses and saving the quality, we have made very good experiences with the “Diploma Supplement” and the “Module Database”.

Выбор оптимальных режимов электростанций с ПГУ

Болонов В.О.

Московский энергетический институт

Оптимизация режимов работы электростанций и оборудования - традиционно одна из сложных научных и практических задач, обусловленная неопределенностью исходной информации, многовариантностью, трудностью учета реального технического состояния оборудования, а также другими факторами.

Используемые в настоящее время методики оптимизации распределения нагрузок разработаны для традиционного состава оборудования ТЭЦ и достаточно мало исследован вопрос учета особенностей режимов работы ПГУ. Вместе с тем, в настоящее время происходит активное внедрение ПГУ на ТЭЦ, поэтому, в рамках задачи оптимального управления ТЭЦ с ПГУ, решается задача разработки методик выбора состава и режимов работы оборудования, а также оптимизации распределения нагрузок между ними.

Для решения данных задач разработана методика построения расходных характеристик ПГУ для ПГУ бинарного типа при частичных теплофикационных нагрузках по характеристикам газовых и паровой турбин.

Для целей учета текущего состояния блока ПГУ на этапе оперативного управления ТЭЦ разработан алгоритм учета влияния режимных параметров ПГУ на величину расхода топлива блока, основанный на введении поправок к расходной характеристике.

Основное внимание уделено разработке алгоритма оптимизации совместного распределения электрической и тепловой нагрузок ТЭЦ при оптимизации режимов работы ТЭЦ с ПГУ. В условиях подачи ценовой заявки на оптовый рынок электроэнергии, наиболее значим критерий экономичности. Поэтому в качестве критерия используется величина топливных затрат (при одинаковой стоимости топлива – суммарный расход топлива). В силу наличия разрывов в характеристиках ПГУ, целевая функция является многоэкстремальной, поэтому в основе методики оптимизации необходимо использовать метод, который эффективен при поиске глобального экстремума. Предлагаемая методика оптимизации основана на совместном применении метода генетического алгоритма (ГА) и метода деформируемого многогранника (МДМ). На основе предварительно полученной методом ГА области минимума целевой функции, МДМ, позволяет найти более точное локальное решение с сокращением вычислительных затрат.

На основе разработанной методики проведены расчеты по оптимизации распределения нагрузок между агрегатами ТЭЦ, в состав которой входят: блок ПГУ-450Т, два паротурбинных блока ПТ-80, а также 5 ПВК, при этом используются данные ОАО “Фирма ОРГРЭС” для ТЭЦ-27 ОАО “Мосэнерго”. Расчеты выполнены для различного сочетания работающих агрегатов, а также различных режимов работы оборудования. Сравнение результатов оптимизации с распределениями при максимальной загрузкой наиболее экономичных агрегатов показало, что разработанная методика достаточно эффективна (до 1,22% экономии топлива).

Для возможности практического применения разработанных алгоритмов разработана схема интеграции методики в АСУ существующих ТЭЦ на базе ПТК, в рамках расчетных станций. На базе данной схемы в настоящее время обсуждается применение разработанных алгоритмов для ТЭЦ-27 ОАО “Мосэнерго”.

Список литературы

1. Аракелян Э.К., Старшинов В.А. Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций. М.: Изд. МЭИ, 1995.
2. Веников В. А., Журавлев В. Г., Филиппова Г. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М.: энергоатомиздат, 1990.
3. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций : учеб. пособие / С.В. Цанев, В.Д. Буров и др., М. : Изд-во МЭИ, 2002. – 580 с.
4. Пусковая схема блока ПГУ-450Т Калининградской ТЭЦ-2 и технология эксплуатации. Том 1. Отчет ВТИ-ТЭП-ОРГРЭС, 2003 г.
5. Дьяков. А.Ф., Березинец П.А., Грибов В.Б., Теплофикационная парогазовая установка Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга. Статические характеристики. Электрические станции 1996, №12, С. 9-16.
6. Паклин Н.Б., Сенилов М.А., Тененев В.А. Интеллектуальные модели на основе гибридного генетического алгоритма с градиентным обучением лидера. Искусственный интеллект. 2004. № 4.

РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И ТЕМПЕРАТУРЫ ОСТРОГО ПАРА.

Борзова Е.В.

Одним из определяющих факторов, который решающим образом влияет на надежность и эффективность функционирования крупного объединения синхронно работающих энергосистем, является необходимость постоянного поддержания во всех частях объединения требуемой частоты электрического тока. С развитием в электроэнергетике рыночных отношений проблема обостряется. Возрастает и роль первичного регулирования частоты, поскольку именно его эффективное функционирование, обеспечивая стабильность частоты, является показателем готовности каждой системы активно участвовать в нормализации частоты и перетоков мощности в объединении при возникновении небаланса мощности в любой из его частей.

Следует учесть, что внедрение системы автоматического регулирования частоты и мощности, удовлетворяющей требованиям привлечения к первичному регулированию частоты, накладывает более жесткие требования к эффективности локальных АСР (АСР общего воздуха; АСР разрежения; АСР температуры перегретого пара; АСР уровня в барабане (для барабанного котла)). Во-первых, быстрое изменение мощности, т.е. участие в регулировании частоты, возможно лишь при автоматическом режиме работы вышеуказанных систем (такая блокировка должна вводиться в САРЧМ). Во-вторых, качество работы локальных систем должно быть проанализировано и по возможности улучшено.

Заинтересовавшись данной проблемой, в рамках своей научно-исследовательской работы я решила рассчитать параметры настроек АСР температуры острого пара с одним и двумя сигналами из промежуточных точек, вводимых через дифференциатор. Результаты расчетов, полученные мною, подробно изложены в работе.

Введение второго скоростного сигнала по температуре улучшает качество регулирования при небольших затратах. Но особенно это необходимо, если по техническим причинам работает только один впрыск. Параметры регуляторов и дифференциаторов достаточно точно могут быть определены непосредственно на объекте, во время наладки, с помощью одного из рассмотренных мною алгоритмов расчета трехконтурной АСР методом компенсированных настроек.

Следующим этапом после разработки таких систем, цель которых заключается в привлечении энергоблоков к первичному регулированию частоты электрического тока, будет внедрение на объекте.

Важно и то, что при разработке систем АРЧМ большое внимание необходимо уделять не только структурному, но и параметрическому синтезу. Наладке такой сложной системы должны предшествовать масштабные испытания на энергоблоке с целью определения динамических характеристик объекта управления в различных режимах работы и на разных нагрузках, что также является важной частью работы.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЫБОРА ПИД-АЛГОРИТМА РЕГУЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ЦИФРОВОЙ РЕАЛИЗАЦИИ В МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ КОНТРОЛЛЕРАХ

Бочаров М.Г.

Московский энергетический институт

В контроллерах программно-технических комплексов используется цифровая реализация алгоритмов регулирования. Анализ существующих ПТК показал, что в их составе представлены так называемые «реальные» ПИД-алгоритмы с физически реализуемым дифференцированием. Так в контроллере Ремиконт Р-380 в составе ПТК «КВИНТ СИ» (ОАО «НИИТеплоприбор» - ООО «КВИНТсистема») выполнена цифровая реализация алгоритма регулирования с фильтром второго порядка при дифференциальной составляющей. Это можно объяснить естественным стремлением воспроизведения апробированных на практике алгоритмов аналоговых регуляторов. В то же время идеальный ПИД-алгоритм, не реализуемый в аналоговых регуляторах и довольно точно реализуемый цифровыми средствами не представлен в библиотеках алгоритмов ПТК.

Проведенные исследования показали, что введение фильтра в дифференциальную составляющую алгоритма регулирования приводит к заметному снижению динамической точности системы управления в сравнении с «идеальным» алгоритмом. Анализ показывает, что параметры фильтра оказывают малое влияние на значения постоянных интегрирования T_{II} и дифференцирования, но существенно влияют на коэффициент передачи регулятора k_p . При введении фильтра максимум амплитудно-частотных характеристик системы смещается к началу координат.

Разработана методика расчета параметров настройки ПИД-регуляторов, обеспечивающая возможность построения систем управления максимальной динамической точности с анализом чувствительности системы управления к вариациям параметров объекта.

Предлагается ввести в библиотеку алгоритмов регулирования программно-технического комплекса «идеальный» ПИД-алгоритм, позволяющий во многих случаях существенно повысить качество процессов регулирования, что, в свою очередь, увеличит экономический эффект от автоматизации технологических процессов.

Имитационное моделирование в задачах анализа и синтеза автоматических систем регулирования

Бочкарёва Е.Ю., Сабанин В.Р., Фейгина А.Н.

Московский энергетический институт

Исследование систем автоматического управления, необходимое для научно обоснованного их проектирования, осуществляется как теоретически, так и экспериментально.

При теоретическом исследовании составляется математическая модель, отражающая свойства реальной системы и служащая непосредственным объектом исследования. Простейшей моделью является линейная модель (например, система линейных дифференциальных или разностных уравнений). Достоинства линейной модели – легкость получения и прозрачность результатов. Однако ввиду сложности реальных систем линейные модели лишь очень приближенно отражают их свойства. Для более глубокого и всестороннего изучения реальных систем необходимо рассмотрение нелинейных моделей (например, систем нелинейных дифференциальных или разностных уравнений, систем с нелинейными звеньями).

Учет нелинейностей реальных характеристик элементов системы и дополнительное введение в систему элементов с существенно нелинейными характеристиками приводит к переходу от линейных дифференциальных уравнений к нелинейным.

В первом случае, если при рассмотрении изменения качества процесса управления за счет влияния нелинейностей не учитывать нелинейности, присущие реальной системе, то возникает необходимость исправления нежелательного эффекта, возникшего под влиянием этих нелинейностей.

Во втором случае речь идет о повышении качества процессов или о получении принципиально новых алгоритмов в управлении за счет введения дополнительных нелинейных элементов. При этом удастся повысить быстродействие и точность системы, уменьшить перерегулирование или компенсировать нежелательное действие имеющихся нелинейностей.

Кроме того, для управления нелинейными объектами с немонотонно экстремальными характеристиками применяют особые схемы управления с автоматическим поддержанием оптимального режима работы объекта. В этом случае решение задачи управления нелинейным объектом можно осуществить с помощью как линейных, так и нелинейных элементов.

В нелинейных системах не работает принцип суперпозиции: при сложных воздействиях процесс в системе не может быть представлен как сумма процессов, получающихся от каждой из составляющих воздействия в отдельности. Это обстоятельство чрезвычайно осложняет количественный анализ нелинейных систем автоматического управления.

Математический аппарат анализа нелинейных систем связан с необходимостью исследования нелинейных дифференциальных уравнений, теория которых содержит множество индивидуальных методов, присущих различным видам уравнений, описывающих систему. Сложность решения нелинейных дифференциальных уравнений вызывает необходимость создания ряда приближенных методов, позволяющих судить о характере процессов, наблюдаемых в системе. При этом нелинейные характеристики реальных элементов системы заменяют некоторыми идеализированными приближенными характеристиками, которые обусловлены как характером нелинейного элемента, так и принятым методом анализа системы.

Таким образом, при анализе процессов в реальной системе пользуются двумя этапами приближения: первый этап – составление нелинейных дифференциальных уравнений, приближенно описывающих систему, а второй – приближенное решение этих уравнений.

Если для полученных на первом этапе приближения уравнений находится точное решение, то говорят о точном решении задачи. Если же имеют место два этапа приближения, т.е. полученные нелинейные уравнения решают рядом упрощений, то говорят о приближенном методе решения задачи[1].

Для решения нелинейных уравнений, кроме аналитических и графических методов, широко применяют численные методы.

Часто возникают проблемы с записью аналитических соотношений или моделирующих алгоритмов исследуемых систем в связи с такими особенностями сложных систем как: наличие элементов непрерывного и дискретного действия; нелинейные соотношения любого характера, описывающие связи элементов системы; воздействие многочисленных случайных факторов.

Поэтому в настоящее время при исследовании сложных систем широкое применение находят методы имитационного моделирования, которые позволяют учитывать вышеперечисленные особенности сложных систем [2].

Математической моделью АСР является дифференциальное уравнение. На практике широко применяются для решения дифференциальных уравнений методы Эйлера и Рунге-Кутты. Полученные рекуррентные выражения используются для описания импульсных и цифровых инерционных систем.

Использование рекуррентных выражений позволяет строить имитационные модели инерционных систем. Имитационная модель обеспечивает эквивалентное преобразование входного воздействия в выходной сигнал физической системы. Реакция модели зависит от ее параметров и входного воздействия. На этом свойстве цифровой модели основана возможность структурного моделирования системы [3].

В данной работе составлены имитационные модели наиболее часто используемых элементов АСР. В качестве примера ниже приведены имитационные модели элементарного апериодического звена (А-звена) и нелинейного элемента (широотно-импульсного модулятора).

Апериодическое звено первого порядка описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T_A \cdot y'(t) + y(t) = k_A \cdot x(t), \quad (1)$$

где k_A – коэффициент апериодического звена, T_A – постоянная времени апериодического звена.

Решение дифференциального уравнения (1) методом Рунге-Куты второго порядка в виде рекуррентного выражения:

$$y_{j+1} = y_j + dt \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{k_A \cdot x_j - y_j}{T_A} + \frac{k_A \cdot x_{j+1} - \left(y_j + dt \cdot \frac{k_A \cdot x_j - y_j}{T_A} \right)}{T_A} \right] \right], \quad (2)$$

где $y_0 = 0$, $x_0 = 0$.

Функция (2) запрограммирована в программной среде MathCAD.

Широтно-импульсный модулятор является основным элементом всех современных контроллеров. Ниже приведены рекуррентные выражения для входящих в схему ШИМ сумматора (3), интегратора (4) и трехпозиционного реле (5).

$$ys_{j+1} = x_{j+1} - y_{j+1}, \quad (3) \quad yi_{j+1} = yi_j + ys_j \cdot \frac{1}{T_o} \cdot dt, \quad (4)$$

$$\begin{aligned} y_{j+1} = A & \text{ if } x_{j+1} > a & \text{if } x_{j+1} < a \wedge x_{j+1} > 0 & \text{if } x_{j+1} > -a \wedge x_{j+1} < 0 \\ y_{j+1} = -A & \text{if } x_{j+1} < -a & \left| \begin{array}{l} y_{j+1} = 0 \text{ if } x_j \leq b \\ y_{j+1} = y_j \text{ otherwise} \end{array} \right. & \left| \begin{array}{l} y_{j+1} = 0 \text{ if } x_j \geq -b \\ y_{j+1} = y_j \text{ otherwise} \end{array} \right. \end{aligned} \quad (5)$$

где x – вход ШИМ, y – выход трехпозиционного реле ШИМ (выход ШИМ), yi – выход интегратора ШИМ, T_o – постоянная времени интегратора ШИМ, ys – выход сумматора ШИМ.

Применение имитационного моделирования упрощает процедуру создания модели АСР для дальнейшего ее исследования. Структура имитационной модели представляет собой совокупность отдельных блочных моделей и связей между ними в их взаимодействии при реализации какого-либо процесса, что позволяет воспроизводить АСР любой сложности. В процессе данной работы были разработаны имитационные модели ряда линейных звеньев и нелинейных элементов. Имитационное моделирование может быть успешно применено для решения задач анализа и синтеза АСР. Имитационные модели позволяют выполнять расчеты при возмущениях практически любой формы, включая случайные, и определять переходные процессы в любой точке системы. В отличие от аналитических методов, основанных на использовании частотных характеристик, имитационная модель может быть использована для исследования неустойчивых систем [4].

Литература

1. Методы исследования нелинейных систем автоматического управления. Под ред. Нелепина Р.А. Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», М, 1975, 448 стр.

2. Цой Е.Б., Самочернов И.В. Моделирование и управление в экономике (часть 1). Курс лекций. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
3. Панько М.А. Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде MathCAD. М.: Изд-во МЭИ, 2004.
4. Бочкарева Е.Ю., Репин А.И., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И. Имитационная модель цифрового регулятора с электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Тез. докл. XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: В 3-х т. М.: Издательство МЭИ, 2006. Т.3. С. 208-210.

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЗАДАЧАХ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Рассматривается применение имитационного моделирования в задачах анализа и синтеза автоматических систем регулирования (АСР). Получены имитационные модели наиболее часто используемых элементов АСР, таких как элементарные звенья и нелинейные элементы.

Исследование систем автоматического управления, необходимое для научно обоснованного их проектирования, осуществляется как теоретически, так и экспериментально.

При теоретическом исследовании составляется математическая модель, отражающая свойства реальной системы и служащая непосредственным объектом исследования. Простейшей моделью является линейная модель (например, система линейных дифференциальных или разностных уравнений). Достоинства линейной модели — легкость получения и прозрачность результатов. Однако ввиду сложности реальных систем линейные модели лишь приближенно отражают их свойства. Для более глубокого и всестороннего изучения реальных систем необходимо рассмотрение нелинейных моделей (например, систем нелинейных дифференциальных или разностных уравнений, систем с нелинейными звеньями).

Учет нелинейностей реальных характеристик элементов системы и дополнительное введение в систему элементов с существенно нелинейными характеристиками приводит к переходу от линейных дифференциальных уравнений к нелинейным.

В первом случае, если при рассмотрении изменения качества процесса управления за счет влияния нелинейностей не учитывать нелинейности, присущие реальной системе, то возникает необходимость исправления нежелательного эффекта, возникшего под влиянием этих нелинейностей.

Во втором случае речь идет о повышении качества процессов или о получении принципиально новых алгоритмов в управлении за счет введения дополнительных нелинейных элементов. При этом удастся повысить быстродействие и точность системы, уменьшить перерегулирование или компенсировать нежелательное действие имеющихся нелинейностей.

Кроме того, для управления нелинейными объектами с экстремальными характеристиками применяют особые схемы управления с автоматическим поддержанием оптимального режима работы объекта. В этом случае решение задачи управления нелинейным объектом можно осуществить с помощью как линейных, так и нелинейных элементов.

В нелинейных системах не работает принцип суперпозиции: при сложных воздействиях процесс в

системе не может быть представлен как сумма процессов, получающихся от каждой из составляющих воздействия в отдельности. Это обстоятельство чрезвычайно осложняет количественный анализ нелинейных систем автоматического управления.

Математический аппарат анализа нелинейных систем связан с необходимостью исследования нелинейных дифференциальных уравнений, теория которых содержит множество индивидуальных методов, присущих различным видам уравнений, описывающих систему. Сложность решения нелинейных дифференциальных уравнений вызывает необходимость создания ряда приближенных методов, позволяющих судить о характере процессов, наблюдаемых в системе. При этом нелинейные характеристики реальных элементов системы заменяют некоторыми идеализированными приближенными характеристиками, которые обусловлены как характером нелинейного элемента, так и принятым методом анализа системы.

Таким образом, при анализе процессов в реальной системе пользуются двумя этапами приближения: первый этап — составление нелинейных дифференциальных уравнений, приближенно описывающих систему, а второй — приближенное решение этих уравнений.

Если для полученных на первом этапе приближения уравнений находится точное решение, то говорят о точном решении задачи. Если же имеют место два этапа приближения, т.е. полученные нелинейные уравнения решают рядом упрощений, то говорят о приближенном методе решения [1].

Для решения нелинейных уравнений, кроме аналитических и графических методов, широко применяют численные методы.

Часто возникают проблемы с записью аналитических соотношений или моделирующих алгоритмов исследуемых систем в связи с такими особенностями сложных систем как наличие элементов непрерывного и дискретного действия; нелинейные соотношения любого характера, описывающие связи элементов системы; воздействие многочисленных случайных факторов.

Поэтому в настоящее время при исследовании сложных систем широкое применение находят методы имитационного моделирования, которые позволяют учитывать вышеперечисленные особенности сложных систем [2].

Математическая модель АСР в общем случае может быть описана системой дифференциальных уравнений. На практике широко применяются для решения дифференциальных уравнений методы Эйлера и Рунге—Кутты. Полученные рекуррентные

выражения используются для описания импульсных и цифровых инерционных систем.

Использование рекуррентных выражений позволяет строить имитационные модели инерционных систем. Имитационная модель обеспечивает эквивалентное преобразование входного воздействия в выходной сигнал физической системы. Реакция модели зависит от ее параметров и входного воздействия. На этом свойстве цифровой модели основана возможность структурного моделирования системы [3].

В данной работе составлены имитационные модели наиболее часто используемых элементов АСР. В качестве примера ниже приведены имитационные модели элементарного аperiodического звена и нелинейного элемента (широтно-импульсного модулятора).

Аperiodическое звено описывается следующим дифференциальным уравнением:

$$T_A y'(t) + y(t) = K_A x(t), \quad (1)$$

где K_A — коэффициент усиления аperiodического звена; T_A — постоянная времени аperiodического звена.

Решение дифференциального уравнения (1) методом Рунге–Кутты второго порядка в виде рекуррентного выражения:

$$y_{j+1} = y_j + dt \left[\frac{1}{2} \left[\frac{K_A x_j - y_j}{T_A} + \frac{K_A x_{j+1} - \left(y_j + dt \frac{K_A x_j - y_j}{T_A} \right)}{T_A} \right] \right], \quad (2)$$

где $y_0 = 0$; $x_0 = 0$.

Функция (2) в программной среде MathCAD приведена в табл. 1.

Пример решения:

$$\begin{aligned} dt &:= 0.1 & T_p &:= 60 & j &:= 1 \dots \frac{T_p}{dt} & t_j &:= j \cdot dt \\ Am &:= 1.5 & \omega &:= 0.15 \\ Ta &:= 10 & Ka &:= 2 \\ y1_0 &:= 0 & y2_0 &:= 0 \\ x1_j &:= Am \cdot \sin(j \cdot \omega \cdot dt) & x2_j &:= 1 \\ y1_j &:= Az(x1_{j-1}, x1_j, y1_{j-1}, Ka, Ta) & y2_j &:= Az(x2_{j-1}, x2_j, y2_{j-1}, Ka, Ta) \end{aligned}$$

Широтно-импульсный модулятор является основным элементом всех современных контроллеров. Структурная схема ШИМ показана на рис. 1.

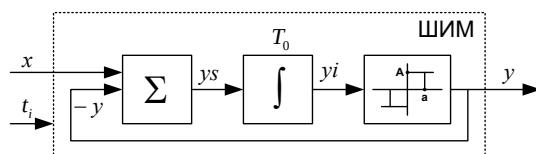


Рис. 1. Структурная схема ШИМ

Ниже приведены рекуррентные выражения для входящих в схему ШИМ сумматора (3), интегратора (4) и трехпозиционного реле (5):

$$y_s_{j+1} = x_{j+1} - y_{j+1}; \quad (3)$$

$$y_i_{j+1} = y_i_j + y_s_j \frac{1}{T_0} dt; \quad (4)$$

$$y_{j+1} = A \text{ if } x_{j+1} > a,$$

$$y_{j+1} = -A \text{ if } x_{j+1} < -a;$$

$$\text{if } x_{j+1} < a \wedge x_{j+1} > 0,$$

$$y_{j+1} = 0 \text{ if } x_j \leq b,$$

$$y_{j+1} = y_j \text{ otherwise};$$

$$\text{if } x_{j+1} > -a \wedge x_{j+1} < 0,$$

$$y_{j+1} = 0 \text{ if } x_j \geq -b,$$

$$y_{j+1} = y_j \text{ otherwise}, \quad (5)$$

где x_{j+1} — вход ШИМ; y_{j+1} — выход трехпозиционного реле (выход ШИМ); A — величина выходного сигнала реле; a — величина зоны возврата ($a = A \cdot t_i$, где t_i — минимальная длительность импульса ШИМ); b — величина зоны нечувствительности; y_i_{j+1} — выход интегратора ШИМ; T_0 — постоянная времени интегратора ШИМ; y_s_{j+1} — выход сумматора ШИМ.

Функция в программной среде MathCAD приведена в табл. 2.

Результат решения показан на рис. 2:

$$\begin{aligned} dt &:= 0.001 & T_p &:= 60 & j &:= 1 \dots \frac{T_p}{dt} & t_j &:= j \cdot dt \\ Am &:= 1.5 & \omega &:= 0.15 \\ ti &:= 0.2 \\ x1_j &:= Am \cdot \sin(j \cdot \omega \cdot dt) & y1 &:= Shim(ti) \end{aligned}$$

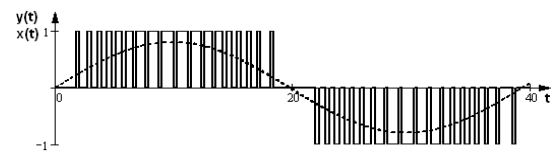


Рис. 2. Реакция ШИМ на гармоническое воздействие

----- вход звена; ————— выход звена

Применение имитационного моделирования упрощает процедуру создания модели АСР для дальнейшего ее исследования. Структура имитационной модели представляет собой совокупность отдельных блочных моделей и связей между ними в их взаимодействии при реализации какого-либо процесса, что позволяет воспроизводить АСР любой сложности. В процессе работы были созданы имитационные модели ряда линейных звеньев и нелинейных элементов. Результаты приведены в табл. 1 и 2.

Имитационное моделирование может быть успешно применено для решения задач анализа и синтеза АСР. Имитационные модели позволяют выполнять расчеты при возмущениях практически любой формы, включая случайные, и определять переходные процессы в любой точке системы. В отличие от аналитических методов, основанных на использовании частотных характеристик, имитационная модель может быть использована для исследования неустойчивых систем [4].

Имитационные модели линейных элементов

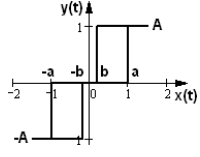
Тип звена	Рекуррентное выражение	Начальные условия	Функция в MathCAD
Пропорциональное звено (П-звено)	$y_{j+1} = K_{\text{п}} x_{j+1}$ $K_{\text{п}}$ — коэффициент пропорциональности (передачи)	—	$\text{Pz}(x, K_{\text{п}}) := K_{\text{п}} \cdot x$ $K_{\text{п}}$ — коэффициент пропорциональности (передачи)
Интегрирующее звено (И-звено)	$y_{j+1} = y_j + x_j \frac{1}{T_{\text{и}}} dt$ $T_{\text{и}}$ — постоянная времени интегрирования	—	$\text{Iz}(x1, y1, T_{\text{и}}) := y1 + x1 \cdot \frac{1}{T_{\text{и}}} \cdot dt$ $T_{\text{и}}$ — постоянная времени интегрирования
Идеальное дифференцирующее звено (ИД-звено)	$y_{j+1} = K_{\text{д}} \frac{x_{j+1} - x_j}{dt}$ $K_{\text{д}}$ — коэффициент усиления дифференцирующего звена	$x_0 = 0$	$\text{Dz}(x, x1, K_{\text{д}}) := K_{\text{д}} \cdot \frac{x - x1}{dt}$ $K_{\text{д}}$ — коэффициент усиления дифференцирующего звена
Реальное дифференцирующее звено (РД-звено)	$y_{j+1} = \frac{K_{\text{д}}}{dt} (x_{j+1} - x_j) + \left(1 - \frac{dt}{T_{\text{д}}}\right) y_j$ $K_{\text{д}}$ — коэффициент усиления дифференцирующего звена; $T_{\text{д}}$ — постоянная времени дифференцирования	$x_0 = 0,$ $y_0 = 0$	$\text{RD}(x, x1, y1, K_{\text{д}}, T_{\text{д}}) := \frac{K_{\text{д}}}{dt} \cdot (x - x1) + \left(1 - \frac{dt}{T_{\text{д}}}\right) \cdot y1$ $K_{\text{д}}$ — коэффициент усиления дифференцирующего звена; $T_{\text{д}}$ — постоянная времени дифференцирования
Апериодическое звено (А-звено)	$y_{j+1} = \left(1 - \frac{dt}{T_{\text{а}}}\right) y_j + K_{\text{а}} \frac{dt}{T_{\text{а}}} x_{j+1}$ $K_{\text{а}}$ — коэффициент усиления апериодического звена; $T_{\text{а}}$ — постоянная времени апериодического звена	$y_0 = 0$	$\text{Az}(x, y1, K_{\text{а}}, T_{\text{а}}) := \left(1 - \frac{dt}{T_{\text{а}}}\right) \cdot y1 + K_{\text{а}} \cdot \frac{dt}{T_{\text{а}}} \cdot x$ $K_{\text{а}}$ — коэффициент усиления апериодического звена; $T_{\text{а}}$ — постоянная времени апериодического звена
	$y_{j+1} = y_j + dt \left[\frac{1}{2} \left[\frac{K_{\text{а}} x_j - y_j}{T_{\text{а}}} + K_{\text{а}} x_{j+1} - \left(y_j + dt \frac{K_{\text{а}} x_j - y_j}{T_{\text{а}}} \right) \right] \right]$ $K_{\text{а}}$ — коэффициент усиления апериодического звена; $T_{\text{а}}$ — постоянная времени апериодического звена	$y_0 = 0$	$\text{Az}(x, x1, y1, K_{\text{а}}, T_{\text{а}}) := y1 + dt \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \left[\frac{K_{\text{а}} \cdot x1 - y1}{T_{\text{а}}} + K_{\text{а}} \cdot x - \left(y1 + dt \cdot \frac{K_{\text{а}} \cdot x1 - y1}{T_{\text{а}}} \right) \right] \right]$ $K_{\text{а}}$ — коэффициент усиления апериодического звена; $T_{\text{а}}$ — постоянная времени апериодического звена
Запаздывающее звено (З-звено)	$y_{j+1} = \begin{cases} j \cdot dt \leq \tau, 0, & x_{j+1 - \frac{\tau}{dt}} \end{cases}$ τ — время запаздывания	$y_0 = 0$	$y1_j := \begin{cases} j \cdot dt \leq \tau, 0, & x1_{j - \text{floor}\left(\frac{\tau}{dt}\right)}, 0 \end{cases}$ τ — время запаздывания; $x1_j$ — вход звена; $y1_j$ — выход звена

Примечание:

x_{j+1} и x_j — текущее и предыдущее входное значение звена (или x , $x1$ — для столбца (4)); y_{j+1} и y_j — текущее и предыдущее выходное значение звена (или y , $y1$ — для столбца (4)); dt — шаг по времени

Имитационные модели нелинейных элементов

Тип звена	Рекуррентное выражение	Статическая характеристика	Функция в MathCAD
1	2	3	4
Зона нечувствительности	$y_{j+1} = 0 \text{ if } x_{j+1} \leq \frac{\Delta}{2}$ otherwise $\begin{cases} y_{j+1} = x_{j+1} + \frac{\Delta}{2} & \text{if } x_{j+1} < 0 \\ y_{j+1} = x_{j+1} - \frac{\Delta}{2} & \text{if } x_{j+1} > 0 \end{cases}$ Δ — величина зоны нечувствительности		$Zn(x, \Delta) := \begin{cases} y \leftarrow 0 & \text{if } x \leq \frac{\Delta}{2} \\ \text{otherwise} \\ y \leftarrow x + \frac{\Delta}{2} & \text{if } x < 0 \\ y \leftarrow x - \frac{\Delta}{2} & \text{if } x > 0 \end{cases}$ $\text{return } y$ Δ — величина зоны нечувствительности
Ограничение	$y_{j+1} = Og \text{ if } x_{j+1} \geq Og$ $y_{j+1} = -Og \text{ if } x_{j+1} \leq -Og$ $y_{j+1} = x_{j+1} \text{ otherwise}$ Og — величина ограничения		$Ogr(x, Og) := \begin{cases} y \leftarrow Og & \text{if } x \geq Og \\ y \leftarrow -Og & \text{if } x \leq -Og \\ y \leftarrow x & \text{otherwise} \end{cases}$ $\text{return } y$ Og — величина ограничения
Двухпозиционное реле	$y_{j+1} = A \text{ if } x_{j+1} > a$ $y_{j+1} = -A \text{ if } x_{j+1} < -a$ $y_{j+1} = y_j \text{ if } x_{j+1} < a \wedge x_{j+1} > -a$ A — величина выходного сигнала реле; a — величина зоны возврата. <i>Для реле без гистерезиса $a = 0$</i>	<i>С гистерезисом</i> <i>Без гистерезиса</i>	$Rel2(x, y1, A, a) := \begin{cases} y \leftarrow A & \text{if } x > a \\ y \leftarrow -A & \text{if } x < -a \\ y \leftarrow y1 & \text{if } x < a \wedge x > -a \end{cases}$ $\text{return } y$ A — величина выходного сигнала реле; a — величина зоны возврата. <i>Для реле без гистерезиса $a = 0$</i>
Трехпозиционное реле	$y_{j+1} = A \text{ if } x_{j+1} > a$ $y_{j+1} = -A \text{ if } x_{j+1} < -a$ $\text{if } x_{j+1} < a \wedge x_{j+1} > 0$ $\begin{cases} y_{j+1} = 0 & \text{if } x_j \leq b \\ y_{j+1} = y_j & \text{otherwise} \end{cases}$ $\text{if } x_{j+1} > -a \wedge x_{j+1} < 0$ $\begin{cases} y_{j+1} = 0 & \text{if } x_j \geq -b \\ y_{j+1} = y_j & \text{otherwise} \end{cases}$ A — величина выходного сигнала реле; a — величина зоны возврата; b — величина зоны нечувствительности. <i>Для реле без гистерезиса $a = b$, для реле с гистерезисом $a > b$</i>	<i>С гистерезисом</i> <i>Без гистерезиса</i>	$Rel3(x, x1, y1, A, a, b) := \begin{cases} y \leftarrow A & \text{if } x1 > a \\ y \leftarrow -A & \text{if } x1 < -a \\ \text{if } x1 < a \wedge x1 > 0 \\ y \leftarrow 0 & \text{if } x \leq b \\ y \leftarrow y1 & \text{otherwise} \\ \text{if } x1 > -a \wedge x1 < 0 \\ y \leftarrow 0 & \text{if } x \geq -b \\ y \leftarrow y1 & \text{otherwise} \end{cases}$ $\text{return } y$ A — величина выходного сигнала реле; a — величина зоны возврата; b — величина зоны нечувствительности. <i>Для реле без гистерезиса $a = b$, для реле с гистерезисом $a > b$</i>
Люфт	$y_{j+1} = x_{j+1} + L \text{ if } x_{j+1} < (y_j - L)$ $y_{j+1} = x_{j+1} - L \text{ if } x_{j+1} > (y_j + L)$ $y_{j+1} = y_j \text{ if } (y_j - L) < x_{j+1} < (y_j + L)$ L — величина люфта		$Luft(x, y1, L) := \begin{cases} y \leftarrow x + L & \text{if } x < y1 - L \\ y \leftarrow x - L & \text{if } x > y1 + L \\ y \leftarrow y1 & \text{otherwise} \end{cases}$ $\text{return } y$ L — величина люфта
1	2	3	4

Широтно-импульсный модулятор (ШИМ)	$y_{j+1} = y_j + y_s \frac{1}{T_0} dt$ $y_{j+1} = A \text{ if } x_{j+1} > a$ $y_{j+1} = -A \text{ if } x_{j+1} < -a$ $\text{if } x_{j+1} < a \wedge x_{j+1} > 0$ $\begin{cases} y_{j+1} = 0 & \text{if } x_j \leq b \\ y_{j+1} = y_j & \text{otherwise} \end{cases}$ $\text{if } x_{j+1} > -a \wedge x_{j+1} < 0$ $\begin{cases} y_{j+1} = 0 & \text{if } x_j \geq -b \\ y_{j+1} = y_j & \text{otherwise} \end{cases}$ $y_{s_{j+1}} = x_{j+1} - y_{j+1}$ $y_{i_{j+1}}$ и y_{i_j} — выход интегратора (текущее и предыдущее значение); $y_{s_{j+1}}$ и y_{s_j} — выход сумматора (текущее и предыдущее значение); T_0 — постоянная времени интегратора; A — величина выходного сигнала реле; a — величина зоны возврата реле M ($a = A \cdot t_i$, где t_i — минимальная длительность импульса ШИМ); b — величина зоны нечувствительности		<pre> Shim(ti) := x0 ← 0 y0 ← 0 yq ← 0 ys0 ← 0 A ← 1 a ← A · ti b ← 0 for j ∈ 1 .. $\frac{T_p}{dt}$ xj ← Am · sin(j · ω · dt) yij ← Iz(ysj-1, yij-1, 1) yj ← Rele3(yij-1, yij, yj-1, A, a, b) ysj ← xj - yj return y </pre> t_i — минимальная длительность импульса; y_{i_j} и $y_{i_{j-1}}$ — выход интегратора (текущее и предыдущее значения); y_{s_j} и $y_{s_{j-1}}$ — выход сумматора (текущее и предыдущее значения); T_0 — постоянная времени интегратора; A — величина выходного сигнала реле ШИМ; a — зона возврата реле; b — зона нечувствительности реле
Выбег исполнительного механизма	$y_{j+1} = -1 \text{ if } [(y_{s_j} < 0) \wedge (y_{s_{j+1}} - y_{s_j} > 0)]$ $y_{j+1} = 1 \text{ if } [(y_{s_j} > 0) \wedge (y_{s_{j+1}} - y_{s_j} < 0)]$ $y_{j+1} = y_{s_j} \text{ otherwise}$ $\text{if } \Delta_{vib} = 0$ $\begin{cases} Vib = 0 \\ y_{j+1} = y_{i_{j+1}} \end{cases}$ otherwise $\begin{cases} \text{if } y_{s_{j+1}} = A \\ y_{j+1} = y_{i_{j+1}} + Vib \cdot y_{n_j} \\ y_{j+1} = y_{i_{j+1}} \\ q = 0 \\ Vib = 0 \end{cases}$ otherwise $\begin{cases} Vib = \Delta_{vib} \cdot \left(1 - e^{-\frac{q}{\Delta_{vib} T_{im}}} \right) \\ y_{j+1} = y_{i_{j+1}} + Vib \cdot y_{n_j} \end{cases}$ $q = q + dt$ $y_{s_{j+1}}$ и y_{s_j} — выход ШИМ (текущее и предыдущее значение); $y_{i_{j+1}}$ — выход интегратора звена (текущее значение); $y_{n_{j+1}}$ и y_{n_j} — направление изменения сигнала с ШИМ (текущее и предыдущее значение); Vib — текущее значение величины выбега; Δ_{vib} — выбег исполнительного механизма; $T_{им}$ — постоянная времени исполнительного механизма	—	<pre> Vb := for i ∈ 0..3 y0,i ← 0 q ← 0 for j ∈ 1 .. $\frac{T_p}{dt}$ yj,0 ← Shimj yj,1 ← -1 if [(yj-1,0 < 0) ∧ (yj,0 - yj-1,0 > 0)] yj,1 ← 1 if [(yj-1,0 > 0) ∧ (yj,0 - yj-1,0 < 0)] yj,1 ← yj-1,1 otherwise if Δvib = 0 Vib ← 0 yj,3 ← yj,2 otherwise if Shimj = A yj,2 ← yj,2 + Vib · yj-1,1 yj,3 ← yj,2 q ← 0 Vib ← 0 otherwise Vib ← Δvib · $\left(1 - e^{-\frac{q}{\Delta_{vib} T_{im}}} \right)$ yj,3 ← yj,2 + Vib · yj,1 q ← q + dt y⁽³⁾ </pre> $y_{j,0}$ и $y_{j-1,0}$ — выход ШИМ (текущее и предыдущее значение); $y_{j,2}$ — выход интегратора звена (текущее значение); $y_{j,3}$ — выход звена типа выбег исполнительного механизма (текущее значение); $y_{j,1}$ и $y_{j-1,1}$ — направление изменения сигнала с ШИМ (текущее и предыдущее значение); Vib — текущее значение величины выбега, Δ_{vib} — выбег исполнительного механизма; $T_{им}$ — постоянная времени исполнительного механизма

Примечание: x_{j+1} и x_j — текущее и предыдущее входное значение звена (или x , x_1 — для столбца (4)); y_{j+1} и y_j — текущее и предыдущее выходное значение звена (или y , y_1 — для столбца (4)); dt — шаг по времени

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методы** исследования нелинейных систем автоматического управления / под ред. Нелепина Р.А. М.: Наука, 1975. 448 с.
2. **Цой Е.Б., Самочернов И.В.** Моделирование и управление в экономике (часть 1): Курс лекций. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
3. **Панько М.А.** Расчет и моделирование автоматических систем регулирования в среде MathCAD. М.: Издательство МЭИ, 2004.
4. **Имитационная** модель цифрового регулятора с электрическим исполнительным механизмом постоянной скорости / Е.Ю. Бочкарёва, А.И. Репин, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. XII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. М.: Издательство МЭИ, 2006. Т. 3. С. 208—210.

Разработка методического и программного обеспечения для имитационного моделирования нелинейных систем регулирования

Бочкарёва Е.Ю.

В настоящее время одной из важнейших задач для промышленности является оптимизация технологических процессов на всех уровнях управления производством. Это связано с необходимостью минимизации затрат на разработку, внедрение, эксплуатацию и последующую модернизацию систем.

Классическая теория автоматического управления рассматривает, как правило, линейные или линеаризованные системы, что изначально упрощает решаемую задачу и обуславливает дополнительную погрешность. При работе в условиях рыночной экономики минимизация затрат имеет решающее значение, давая возможность к постоянному развитию существующих производственных мощностей.

Энергетическая отрасль предъявляет особые требования к качеству автоматизации процессов, поскольку именно ее эффективность (качество и стоимость электроэнергии) оказывает влияние на конкурентоспособность всех остальных отраслей промышленности. При этом большинство объектов в энергетике являются нелинейными и сложными для автоматизации. Повышенные требования к безопасности ограничивают возможности испытаний новых систем управления на реальных действующих объектах.

Примером оптимизации работы систем с нелинейными элементами может служить управление исполнительными механизмами постоянной скорости посредством ШИМ (стандартное решение в АСУ ТП в энергетике). В данном случае оптимизация позволяет минимизировать количество включений электродвигателя, что положительно сказывается на энергопотреблении и ресурсе устройства. Проведенные исследования показали, что при использовании имитационного моделирования нелинейных систем возможно сокращение количества включений двигателя в 1,5 – 2 раза.

При решении любой задачи необходим набор инструментов, облегчающих труд, как исследователя, так и проектировщика. В связи с этим возникает задача по разработке методики имитационного моделирования нелинейных систем управления. Имея такой инструментарий возможно решение практически любой задачи по усовершенствованию системы управления. В частности его можно применять для регулирования мощности энергоблоков, что особенно важно в условиях свободного рынка электроэнергии, когда экономичная работа оборудования при изменении нагрузки и требования по поддержанию частоты в энергосистеме выходят на первый план.

Реализация проекта по оптимизации управления нелинейными системами требует проведения дальнейших исследований для получения решений, как для каждого элемента системы, так и их взаимосвязей.

Внедрение передовых технологий позволит значительно сократить издержки энергетического производства, повысить надежность работы оборудования и обеспечит возможность перехода на новую ступень развития управляемости энергосистемы.

Учет фактора надежности при выборе состава генерирующего оборудования ТЭС

Гусева О.А., ст., Аракелян Э.К., д.т.н., проф.

Московский энергетический институт

Энергоблоки являются важнейшим элементом тепловых электростанций (ТЭС) и энергосистем, от надежной работы которых зависит функционирование самой системы и объектов народного хозяйства, являющихся потребителями электроэнергии и тепла.

Электрическая энергия в течение суток потребляется неравномерно, а в воскресные и праздничные дни и в летний период ее использование уменьшается, поэтому суточная, недельная и годовая неравномерность спроса нередко обуславливает эксплуатацию оборудования в нестационарных (переменных) режимах.

Резко-переменный характер суточного графика порождает проблему прохождения ночных и дневных провалов нагрузки, и, следовательно, выбора состава генерирующего оборудования, оптимального распределения нагрузки между энергоблоками.

Для каждого агрегата станции определяется режим работы по выработке электроэнергии и мощности «на сутки вперед».

На 3-4 суток вперед станция должна прогнозировать состав оборудования на операционные сутки Х. Но при сегодняшнем состоянии оборудования такое прогнозирование связано с очень большим риском и высокими требованиями обеспечения надежности оборудования, а заявленный за 3-4 суток вперед состав генерирующего оборудования менять уже нельзя, а все отклонения от заданного графика отпуска электроэнергии и нарушения заявленного состава оборудования облагаются штрафами (штрафные санкции).

Методика учета фактора надежности

Расчет структурной надежности ТЭС включает в себя следующие этапы:

1. представление ТЭС в виде функционально-структурной схемы с определением взаимосвязей между элементами;

Функциональная тепловая схема энергоблока преобразуется в структурную схему в соответствии с принципом: включаются только те элементы и связи, которые структурно определяют надежность функционирования энергоблока.

2. формирование исходных данных по надежности элементов структурных схем;

Надежность каждого элемента может быть представлена стационарными значениями показателей: временем наработки на отказ T_0 , ч (или частотой отказов ω , 1/год), временем восстановления T_B , ч.

Частота отказов элементов оценивается числом повреждений (выходом из строя) элементов в единицу времени и определяется как отношение числа отказавших элементов n_0 за период Δt к общему числу однотипных элементов n :

$$\omega = \frac{n_0}{n \cdot \Delta t} = \frac{8760}{T_0} = 8760 \cdot \lambda$$

3. расчет вероятностей возможных состояний системы;

Модель дерева событий (отказов) представляется в виде:

$$(\omega T) = \sum_{i=1}^n \omega_i T_{Bi} + \sum_{j=1}^m \prod_{1}^2 \omega_j T_{Bj} + \sum_{y=1}^k \prod_{1}^3 \omega_y T_{By}$$

где n – количество последовательно соединенных элементов; m, k – количество элементов с одним и двойным резервированием.

Вероятность состояния отказов в этом случае:

$$P = \left(\frac{\omega T}{8760} \right) = \sum_{i=1}^n P_i + \sum_{j=1}^m \prod_{1}^2 P_j + \sum_{y=1}^k \prod_{1}^3 P_y$$

4. расчет комплексных показателей надежности.

Коэффициент простоя энергоблока

$$q = \frac{P}{1 + P}$$

коэффициент готовности

$$K_{\Gamma} = 1 - q = \frac{1}{1 + P}$$

коэффициент оперативной готовности

$$k_{oe}(t) = K_{\Gamma} \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Полученные численные данные оперативной готовности по каждому энергоблоку используются при выборе оптимального состава генерирующего оборудования.

При отсутствии статистических данных показатели надежности будут оценены на основании экспертных оценок эксплуатационного персонала.

Данная методика будет рассмотрена на примере Ириклинской ГРЭС.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Ротач В.Я.

1. Анализ применяемых критериев оптимальности

В настоящее время при выборе критерия оптимальности системы автоматического управления (САУ) в подавляющем числе случаев ориентируются на *качество* процесса изменения управляемой величины, вызванного возмущением ступенчатой формы. Поскольку на реальные объекты могут действовать по каналам с различной динамикой, предварительно предполагается выбор наиболее представительного из них.

Конкретно качество процесса определяется значениями некоторого числа *показателей качества*, в число которых обычно входят *максимальное отклонение в статике и динамике*, его *длительность*, а также *интенсивность затухания колебаний*. Максимальное отклонение и длительность процесса объединяются в один *интегральный показатель*, который в геометрической интерпретации точно или приближенно характеризует площадь под графиком изменения управляемой величины. Поскольку процесс этого изменения может быть колебательным, интеграл берется не от самой управляемой величины, а от ее модуля (*модульный интегральный показатель*), либо управляемая величина предварительно возводится в квадрат (*квадратичный интегральный показатель*). Учет же показателя интенсивности затухания колебаний производится различными способами. Наиболее распространенными в публикациях по теории автоматического управления (ТАУ) технологическими процессами способами являются два:

1. Введение показателя интенсивности затухания колебаний в виде функции штрафа в соответствующим образом сконструированный *обобщенный интегральный показатель*.

2. Введение требования *должного запаса устойчивости* системы в явном виде, как ограничения на обычный интегральный показатель.

В первом случае задача рассматривается как *многокритериальная*. Формирование обобщенных показателей производится известными из теории *математического программирования* методами многокритериальной оптимизации, для чего чаще всего используется *принцип свертки* [1]. В соответствии с этим принципом обобщенный критерий представляет собой взвешенную сумму частных критериев. В большинстве публикаций ухудшение затухания колебаний связывается с ростом интеграла квадрата управляющего воздействия, так что обобщенный интегральный критерий принимает вид [2]:

$$I_{обц} = \int_0^{\infty} [y^2(t) + e^2 \mu^2(t)] dt. \quad (1)$$

Функция под интегралом, зависящая от управляющего воздействия $\mu(t)$, является *функцией штрафа*, а число e характеризует ее «вес». Критерием оптимальности является минимум этого показателя при заданном весе «штрафа», конкретное значение которого определяется подбором исходя из удовлетворительного затухания процесса изменения управляемой величины. Встречаются и другие способы формирования обобщенного критерия, например, введением в интеграл (1) производных от управляемой величины [3], оценки степени затухания процесса и т. п.

Вычисление процесса управления в одноконтурной системе производится по передаточной функции, связывающей изображение управляемой величины с изображением возмущения:

$$Y(s) = \Phi_{y\lambda}(s) \Lambda(s) \quad (2)$$

$$\text{где: } \Phi_{y\lambda}(s) = \frac{W_{y\lambda}(s)}{1 + W(s)}, \quad (3)$$

$$W(s) = R(s) W_{y\mu}(s), \quad (4)$$

$W_{y\lambda}(s), W_{y\mu}(s), R(s), W(s)$ - передаточные функции объекта по каналу действия на управляемую величину $y(t)$ возмущения $\lambda(t)$, объекта по каналу действия на управляемую величину управляющего воздействия $\mu(t)$, регулятора, разомкнутого контура.

Подобным же образом определяются изображение управляющего воздействия $\mu(t)$.

Поведение объектов без запаздывания, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, может быть также рассматриваться в пространстве переменных состояния x . В этом случае обобщенный интегральный критерий записывается в виде [4]:

$$I = \int_0^{\infty} (x^T F x + \mu^T E \mu) dt, \quad (5)$$

где: F и E матрицы коэффициентов веса. Определение параметров настройки регулятора из условия минимизации этого выражения находится методом, получившим название *аналитического конструирования регуляторов*.

Аналогично формулируется критерий оптимальности, если определяющим является среднеквадратическое отклонение (СКО) управляемой величины, только квадраты переменных заменяются их дисперсиями.

Второй способ оценки колебательности процесса управления предложенный профессором кафедры АСУ ТП МЭИ Е.Г. Дудниковым [5], состоит в наложении ограничения на расположение корней характеристического уравнения системы. Рабочим инструментом до-

стижения этой цели служит аппарат так называемых *расширенных* частотных характеристик и соответствующим образом модифицированный критерий Найквиста. Расчет начинается с построения границы области требуемого затухания процесса управления в пространстве параметров настройки регулятора из условия прохождения расширенной КЧХ разомкнутого контура $W(-m\omega + j\omega)$ (m – степень колебательности процесса). Подобным образом обеспечение требуемого затухания процесса управления решает эту задачу не только по отношению к процессу относительно рассматриваемого возмущения, но также к процессу, вызванному любым возмущением, и, в сущности, является ограничением на запас устойчивости системы.

После этого в найденной области ищется минимум обычных интегральных критериев, для чего необходимо располагать, как и раньше, помимо передаточной функции объекта по управляющему каналу, также передаточной функцией по каналу действия выбранного возмущения. Исключение составляет линейный интегральный критерий, который можно применять при достаточно сильном затухании процесса (при достаточно большом значении m):

$$I_{лин} = \int_0^{\infty} y(t) dt. \quad (6)$$

Для системы с ПИД регулятором, передаточная функция которого определяется формулой:

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (7)$$

(где: k_p, T_i, T_d -коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования) минимум этого критерия имеет место при максимуме отношения

$$\frac{k_p}{T_i} \rightarrow \max, \quad (8)$$

так что при оптимизации настройки в этом случае можно ограничиться только одной КЧХ объекта по управляющему каналу.

Вместо ограничения на расположение корней, можно ввести ограничение на расположение комплексной частотной характеристики (КЧХ) разомкнутого контура системы $W(j\omega) = R(j\omega)W_{ym}(j\omega)$ [7, 8]: она не должна заходить внутрь окружности радиуса $r = \frac{A_{max}}{(A_{max}^2 - 1)}$, центр которой расположен на отрицательной вещественной полуоси на расстоянии $u = r A_{max}$ от начала координат. «Опасная» с точки зрения критерия устойчивости Найквиста точка $-1, j0$ расположена внутри этой окружности, так что выполнение указанного требования может рассматриваться по-прежнему как обеспечение требуемого запаса устой-

чивости системы. Передаточная функция замкнутого контура системы определяется формулой:

$$\Phi_{yx}(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)}. \quad (9)$$

так что, если КЧХ разомкнутого контур касается окружности с индексом M , то модуль КЧХ замкнутого контура системы при обычно встречающемся виде КЧХ объектов управления имеет резонансный пик A_{max} при частоте касания ω_{res} . Поэтому колебательность процесса может также охарактеризована относительным значением резонансного пика (*частотным показателем колебательности*):

$$M = \frac{A_{max}}{A_0}, \quad (10)$$

где A_0 - значение модуля КЧХ при нулевой частоте (в системах с интегралом в законе управления оно равно единице).

Судя по публикациям, оба подхода к формулировке критериев (обобщенным интегральным с ограничением на колебательность процесса в виде функции штрафа и обычным интегральным с явным ограничением на запас устойчивости) считаются равноценными, и выбор между ними определяется лишь теми или иными вычислительными соображениями или даже привычкой. Между тем, между ними существует кардинальное различие.

Оптимизация по обобщенным интегральным критериям предполагает рассмотрение проблемы качества только с точки зрения вида процесса управления при выбранном воздействии без учета специфики САУ как замкнутых систем с обратными связями, способными породить собственные колебания вне зависимости от наличия заметных внешних воздействий. Для другого входного воздействия, входящего в другую точку объекта процесс управления окажется иным, а, следовательно, иным окажется и затухание колебаний.

Как легко видеть, однозначной связи между определением колебательности по обобщенному интегральному показателю качества и расположением корней характеристического уравнения системы не существует, поскольку учитываемый в нем процесс управления определяется не только корнями (полюсами передаточной функции), но и ее нулями. Не существует в этом случае и связи с запасом устойчивости, определяемом по КЧХ разомкнутого контура, так как эта реакция зависит не только от КЧХ разомкнутого контура, но и от КЧХ объекта по каналу действия возмущения.

Наглядное представление о необходимости явно учитывать при формулировке критерия оптимальности запас устойчивости дает обращение к фундаментальному принципу кибернетики, устанавливающим *общность и единство процессов управления и связи в машинах и организмах* (именно так понимал Н. Винер главное назначение этой в то время новой

науки). В [6] приводится подробное описание медицинских экспериментов, показавших, что наиболее распространенные формы психических заболеваний человека связаны с нарушением нормальной деятельности в мозгу обратных связей. Соответственно, психическому здоровью человека соответствует в области САУ достаточно большой запас устойчивости их замкнутых контуров.

Вспомним, например, как решается задача допуска к управлению каким-либо механизмом, например автомобилем, человека. Для получения водительских прав ему необходимо предъявить два документа: во-первых, справку из медучреждения о психическом здоровье и, во-вторых, справку о сдаче экзамена по практическому вождению. Этому требованию в области САУ соответствует критерии оптимальности, которые состоят из двух составляющих: требованию к запасу устойчивости и требованию к точности управления при заданных воздействиях. Расчету САУ на обобщенный критерий качества (1) соответствовало бы оформление водительского удостоверения без медицинской справки, только на основе успешной сдачи экзамена по вождению. О психическом здоровье претендента предполагалось бы судить по его поведению при сдаче экзамена по вождению. Нетрудно представить себе последствия: за рулем наверняка оказались бы психически неуравновешенные субъекты. Подобно тому, как во время испытательной поездки при сдаче практики вождения могут не встретиться ситуации, при которых испытуемый не смог справиться с управлением, при синтезе САУ на заданное, считающееся типовым, воздействие нет уверенности, что в дальнейшем в процессе эксплуатации системы не возникнут другие воздействия или шумы, которые вызовут недопустимо большую колебательность процессов управления.

Таким образом, при синтезе САУ технологическими процессами обобщенными интегральными критериями, строго говоря, не следовало бы пользоваться в принципе.

2. Применение критериев теории инвариантности

Ориентировка на возмущения ступенчатой формы может быть допущена, если рассматривать их не как типовые, а как наиболее тяжелые, вызывающие наибольшее отклонение управляемой величины. Остается, однако, проблема оптимизации нормальных условий работы САУ, когда она находится под воздействием случайных стационарных возмущений и интерес представляет не только выбросы управляемой величины, вызванные ступенчатым изменением возмущений, но и среднее за длительное время отклонение управляемой величины. Методология оптимизации по критерию минимума дисперсии была предложена уже в первых работах по теории сервомеханизмов [7], однако в практике автоматизации технологических процессов сколько-нибудь заметного применения не получила (если не считать нескольких диссертаций). По-видимому, связано это с необходимостью располагать корреляционными функциями возмущений, для оценки которых с требуемой точностью необходимы

неприемлемо длительные их реализации (как показывают примеры расчетов типичных объектов – порядка месяца [9]) при условии, что все это время объект будет оставаться в обычном стационарном режиме функционирования. По очевидным причинам не могут быть получены оценки корреляционных функций недоступных для контроля возмущений, наличие которых является одной из особенностей промышленных объектов управления.

В этой связи уместно обратиться к предложенному в [8] показателю, который может рассматриваться как принадлежащий к показателям *теории инвариантности*, характерной особенностью которой является отсутствие необходимости в знании характеристик возмущений. Оптимизация здесь начинается с формулировки условий, при выполнении которых отклонение управляемой величины полностью устраняется (условий *абсолютной инвариантности*). Если абсолютная инвариантность оказывается реально недостижимой, приходится уходить от идеальных характеристик системы, упрощая их на основании тех или иных эвристических соображений. Естественно, это приводит к появлению отклонений управляемой величины, что стало причиной наименования получаемых таким образом систем как систем, «инвариантных до ε » (так на структурных схемах обычно обозначается ошибка управления) [10].

При использовании для синтеза САУ частотных методов, требование абсолютной инвариантности сводится к требованию равенства нулю соответствующих частотных характеристик на всем диапазоне частот от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$. Из (3) – (4) следует, что выполнение этого требования возможно только при бесконечно большом усилении в регуляторе, что входит в противоречие с устойчивостью контура. Известно, однако, что вне зависимости от физической природы реальных возмущений (случайных или детерминированных, в том числе ступенчатой формы), их наибольшая интенсивность сосредоточена в низкочастотной области. Это обстоятельство позволяет представить передаточную функцию системы в окрестности нулевой частоты рядом Тейлора и для достижения абсолютной инвариантности потребовать равенства нулю его коэффициентов. Если же ограничиться инвариантностью «до ε », можно рассматривать только два первых члена разложения [8, 9]:

$$\Phi_{y\lambda}(s) \approx C_0 + C_1 s, \quad (11)$$

$$\text{где: } C_0 = [\Phi_{y\lambda}(s)]_{s=0}; \quad C_1 = \left[\frac{d}{ds} \Phi_{y\lambda}(s) \right]_{s=0}, \quad (12)$$

и не требовать равенства нулю этих коэффициентов, а требовать только их минимума.

Выражение для $\Phi_{y\lambda}(s)$ системы с интегралом в алгоритме функционирования регулятора можно записать следующим образом:

$$\Phi_{y\lambda}(s) \approx s \Phi_{y\lambda}^0(s)$$

Следовательно, $C_0 = 0$ и оптимизация настройки регулятора сводится в этом случае к минимизации коэффициента C_1 , который может быть вычислен по формуле:

$$C_1 = \left[\frac{d}{ds} \Phi_{y\lambda}^0(s) s \right]_{s=0},$$

или, применяя правило дифференцирования произведения двух функций:

$$C_1 = \left[s \frac{d}{ds} \Phi_{y\lambda}^0(s) + \Phi_{y\lambda}^0(s) \right]_{s=0} = \left[\Phi_{y\lambda}^0(s) \right]_{s=0} = \left[\frac{\Phi_{y\lambda}(s)}{s} \right]_{s=0}. \quad (13)$$

В соответствии с известными правилами операционного исчисления, эта формула во временной области определяет конечное значение интеграла от переходной характеристики системы, т. е. значение линейного интегрального критерия (6). В частности, для системы с ПИД регулятором формула (13) приводит к выражению, совпадающему с линейным интегральным критерием оптимальности (8).

Полученный критерий остается неизменным для любого из возмущений, т. е. его применение минимизирует как СКО управляемой величины, так и линейный интегральный критерий по отношению ко всем возмущениям, как доступным, так и недоступным для контроля. Такого рода инвариантность называется *полиинвариантностью*. Следовательно, можно утверждать, что формулой (13), определяется достаточно универсальный и, к тому же, очень простой для расчетов критерий оптимальности, не требующий знания корреляционных функций возмущений. Применение рассматриваемого критерия оптимизирует также настройку при изменении задания регулятору.

Важное сомнение относительно практического применения критерия (13) касается правомерности считать входные воздействия САУ низкочастотными, т. е. не является ли условие низкочастотности воздействий уникальным, не характерным для реальных САУ. Спорным остается вопрос об ориентировке на линейный интегральный критерий - во всех публикациях по ТАУ применяется квадратичный или модульный критерии.

Ответ на эти вопросы может быть получен лишь расчетами достаточно представительных примеров. При их выполнении полезно учитывать, что практика обычно требует, чтобы значение ошибки управления в САУ, отнесенное к отклонению управляемой величины при отсутствии управления, было бы достаточно малым. Это соображение и целесообразно положить в основу определения понятие «низкочастотное воздействие», т. е. считать возмущение низкочастотным, если его действие вызывает достаточно малую относительную СКО.

Пример. Передаточная функция управляющего канала объекта – пароперегревателя котла электростанции определяется формулой:

$$W_{\mu}(s) = \frac{0,45 \exp(-0,52 s)}{(0,9 s + 1)^3}$$

Граница области запаса устойчивости по $m = 0,366$ для системы с ПИ регулятором в координатах «частота ω - коэффициент веса при интегральной составляющей регулятора k_p/T_i » показана на рис. 1. Оптимум настройки регулятора при ограничении на по линейному интегральному критерию находится в вершине этого графика и оказался следующим: $k_p = 1,84; T_i = 3,02$; на рис. 1 соответствующая точка обозначена кружком. Оптимум настройки по квадратичному интегральному критерию: $k_p = 2,5; T_i = 4,84$, обозначен крестиком. Графики процессов управления при ступенчатом возмущении со стороны регулирующего органа для обоих критериев показаны на рис. 2 («Лин» – линейный критерий, «Квадр» – квадратичный). Очевидно, что с точки зрения величины перерегулирования предпочтение следует отдать квадратичному критерию.

Потребуем теперь, чтобы СКО управления САУ, отнесенное к отклонению управляемой величины при отсутствии управления, было достаточно малым, например, равным 0,05. Будем полагать, что корреляционная функция приведенного к выходу объекта возмущения $v(t)$, эквивалентного действию всех возмущений, относится к числу типичных, допускающую аппроксимацию выражением [11]:

$$r_v(\tau) = d_v \left[\frac{4}{3} \exp(-\alpha |\tau|) - \frac{1}{3} \exp(-4\alpha |\tau|) \right].$$

Для того, чтобы была получена указанная точность управления при настройке по линейному критерию параметр α должен иметь значение 0,007. Изменение СКО, отнесенное к ее значению при оптимуме настройки по линейному критерию, при движении вправо от точки максимума вдоль границы области запаса устойчивости приведен на рис. 3 (кривая 1). Как видим, СКО при этом монотонно возрастает, т. е. настройка по линейному критерию (обозначена кружком) является оптимальной. Здесь же крестиком обозначена точка, соответствующая настройке по квадратичному критерию; СКО при этом оказалась в 1,2 раза больше, чем при настройке по линейному критерию. На рис. 3 показаны, кроме того, графики для относительной СКО 0,1, 0,2 и 0,3 (кривые 2, 3, 4); такие значения СКО, по-видимому, охватывают весь диапазон возможных требований к точности работы САУ. Рассмотрение графиков позволяет сделать вывод, что настройка по линейному интегральному критерию дает результат, достаточно близкий к оптимуму, даже при маловероятно большой величине СКО, составляющей 0,3 от ее значения при отсутствии всякого управления. Следовательно, все возмущения могут рассматриваться как низкочастотные. Несколько неожиданным оказывается ответ на вопрос о применимости квадратичного интегрального критерия. Заметного увеличения

точности управления по СКО он не дает; напротив, после перехода от линейного критерия к квадратичному возникает опасность значительного ее увеличения, если окажется, что возмущения занимают достаточно узкую полосу частот.

Рассмотренный пример подтверждает целесообразность использования критерия инвариантности «до ε » (иначе говоря – линейного интегрального критерия) при синтезе САУ, по крайней мере, на этапе ее проектирования. Окончательное решение должно быть отнесено на стадию ввода САУ в эксплуатацию, когда применение статистических методов оценки свойств возмущений значительно упрощается (поскольку, например, центрирование реализаций осуществляется самой системой). В этой связи следует иметь в виду, что синтез САУ должен быть продолжен на стадии ее ввода в эксплуатацию с помощью алгоритмов адаптации и по другой причине - исходя из требований к надежности оценки модели объекта управления [9].

В заключение, следует отметить целесообразность проведения обследования реально работающих САУ с точки зрения допустимого отклонения их управляемых величин, сравнительно с отклонениями, которые возникли бы при отсутствии всякого управления (в том числе и ручного). Это позволит, более обоснованно подойти к выбору критериев оптимальности при проектировании САУ, которые в настоящее время, как правило, проектируются вообще без какого-либо учета случайного характера возмущений.

Литература

1. Математический энциклопедический словарь. *Прохоров Ю.В. (ред.)*. М.: Советская Энциклопедия. 1988.
2. *Цыпкин Я. З.* Основы теории автоматических систем. Наука. 1977.
3. *Фельдбаум А.А.* Электрические системы автоматического регулирования. Издательство оборонной промышленности. 1954.
4. *Рей У.* Методы управления технологическими процессами. Мир. 1983.
5. *Дудников Е. Г.* Основы автоматического регулирования тепловых процессов. Госсэнергоиздат. 1954.
6. *Винер Н.* Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. Советское радио. 1958.
7. Теория следящих систем, под ред. *Х. Джеймса, Н. Николса, Р. Филиппса*. Иностранная литература. 1953.
8. *Ротач В.Я.* Расчет настройки промышленных систем регулирования. Госсэнергоиздат. 1961.
9. *Ротач В. Я.* Теория автоматического управления. Изд. МЭИ. 2007.

10. *Петров Б.Н., Солодовников В.В., Топчиев Ю.И. (под ред.)* Современные методы проектирования систем автоматического управления. М.: Машиностроение. 1967.
11. *Ицкович Э.Л.* Статистические методы при автоматизации производств. М.: Энергия. 1964.

ОЦЕНКА ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ НА БАЗЕ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ

Г.Д. Крохин¹, В.С. Мухин²

¹Новосибирский государственный технический университет,

²Московский энергетический институт (технический университет)

АННОТАЦИЯ

Рассмотрены вопросы, связанные с построением концептуально нового подхода к системам технического обслуживания энергоустановок тепловой электростанции на основе интеллектуальной диагностики и нечетких моделей состояния с целью продления ресурса и, соответственно, «срока жизни». В новых условиях рыночной экономики при значительном износе оборудования, повышенной неопределенности информации об остаточном ресурсе старые формы техобслуживания себя исчерпали. Поэтому принятие решений о продлении дальнейшей эксплуатации, выводе в ремонт или демонтаж оборудования позволяет рассматривать процесс изменения ресурса на основе знания истинного состояния критических элементов агрегата на базе нечетких моделей и, соответственно, моделировать его в режиме реального времени как непрерывный процесс, протекающий параллельно эксплуатации энергоустановки.

ВВЕДЕНИЕ

Под долговечностью будем понимать, способность объекта сохранять работоспособность до предельного состояния с учетом перерывов на техническое обслуживание и ремонт. Сюда включают также гамма-процентный ресурс, средний ресурс, назначенный ресурс, средний ремонтный ресурс, средний ресурс до списания, средний ресурс до капитального ремонта, гамма-процентный срок службы, средний срок службы, средний межремонтный срок службы, средний срок службы до капитального ремонта, средний срок службы до списания [1, 2]. При предельном состоянии невозможна или экономически нецелесообразна дальнейшая эксплуатация энергоустановки, обусловленная, например, снижением эффективности, требованиями безопасности и т.д.

На долговечность энергоустановок влияют различные факторы, содержащие элементы нечеткости (неопределенности), которые не возможно определить традиционными методами анализа. В данной работе предлагается вариант оценки долговечности турбоустановки с помощью методов теории нечетких множеств, [3-5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В качестве объекта исследования рассматривается турбогенератор как один из наиболее важных и ответственных элементов энергетического блока. Его состояние определяется множеством параметров и различных внутренних и внешних воздействий. При этом, следует учитывать влияние как режимных факторов, так и конструктивных особенностей исследуемого объекта.

Принципиально все эти факторы с учетом их взаимного влияния не позволяют построить целостное и адекватное представление о состоянии объекта в режиме реального времени на основе известных традиционных для управления методов оценки состояния оборудования. Определим некоторые подходы и условия построения моделей на основе нечеткой логики.

Выберем некоторую область параметров. В этой области имеются X и Y – параметрические множества, а f – отображение множества X в Y .

Тогда, если f – размытое отображение, а X – размытое множество, то отношение $f : X \rightarrow Y$ будет представлено размытой функцией, которую обозначим в виде $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$. Условимся далее, что если $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ представляет n – мерный размытый вектор [6], то функция $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ – есть n – мерная размытая функция (F – функция), [7]. В области нечетких множеств рассмотрим следующие случаи:

1) f – размытое отображение; X – размытое множество, тогда $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{x})$ (рис. 1). Соответствующая этому случаю, функция принадлежности будет определяться в виде:

$$\mu_{B_*}(y) = \max_{x \in N} \mu_{N_*}(x, f),$$

или $\mu_{N_*}(x, f) = \mu_{A_*}(x) \wedge \mu_R(x, f),$ (1)

где R – декартово произведение $X \times Y$.

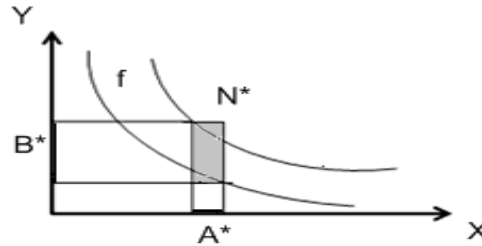


Рис. 1.

2) f – не размытое отображение; X – размытое множество, тогда $\tilde{y} = f(\tilde{x}),$ (рис. 2):

$$\mu_{B_*}(y) = \mu_{A_*}(x) \quad (2)$$

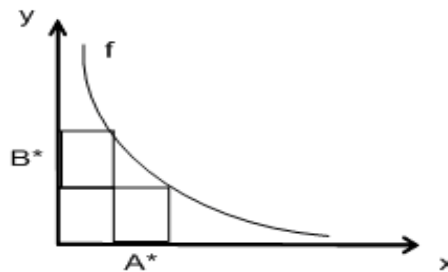


Рис. 2.

3) f – размытое отображение; X – не размытое множество, тогда $\tilde{y} = f(x),$ (рис. 3):

$$\mu_{B_*}(y) = 1 \wedge \mu_R(x, f) = \mu_R(x, f). \quad (3)$$

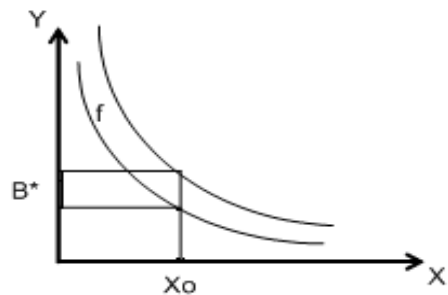


Рис. 3.

Такой подход позволяет для конкретного энергетического агрегата выполнить анализ его состояния и дать соответствующие рекомендации.

2. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ФУНКЦИОНИРУЮЩЕЙ ТУРБОУСТАНОВКИ

Предположим, что на интервале времени $(0, t)$ известны статистические данные, характеризующие функционирование данной энергоустановки, на основании которых можно будет приблизительно прогнозировать время вывода турбоустановки в ремонт. Назовем нормальным функционированием способность энергоустановки выполнять свои функции в пределах нормы в интервале $(0, T)$. Это характеризуется F – функцией $\tilde{y} = \tilde{f}(\tilde{\alpha}, \tilde{t}),$ где

$$(\alpha, t) \in A = \{(\alpha, t) / \mu_A(\alpha, t)\},$$

$$\mu(y) = \max_{t \in [0, T]} \{\mu_A(\alpha, t) \wedge \mu_R(y, \alpha, t)\}. \quad (4)$$

Здесь $0 \leq y \leq 1,$ α – некоторый параметр. В частности, если за норму примем условие $y \geq r,$ где $0 < r < 1$ (рис. 4),

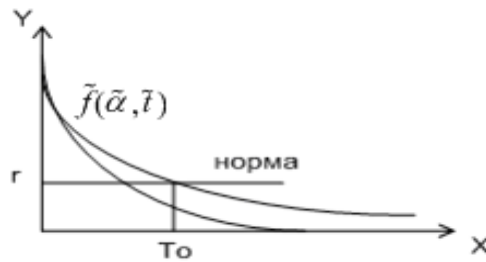


Рис. 4.

то $(0, T_0)$ будет интервалом нормального функционирования энергоустановки в пределах заданной нормы.

Факторы, влияющие на состояние турбоустановки по критерию надежности ее элементов, можно классифицировать следующим образом: ухудшающие состояние агрегата, т.е. способствующие возникновению отказа (например, температура смазки подшипников, температура баббита подшипников, давление в регулирующей ступени, большая разница температур металла верха и низа цилиндра, изменение значения вибрации при изменении мощности и т.п.); и факторы, улучшающие состояние агрегата (например, техническое обслуживание, плановая замена изношенных узлов и деталей, восстановление). В зависимости от этих влияющих факторов можно построить различные F -функции $f(\alpha, t)$, которые характеризуют нормальное функционирование турбоустановки. Представим параметр α в другой форме, т.е. разделим параметр α на две группы: α_1 – параметры ухудшающих векторов; α_2 – параметры улучшающих векторов. Тогда вместо функции $\tilde{y} = f(\alpha, t)$ получим $\tilde{y} = \tilde{f}(\alpha_1, \alpha_2, t)$.

Известно, что α_1, α_2 n -мерные размытые векторы, т.е.

$$\alpha_i \in A_{\alpha_i} = \{\alpha_i / \mu_{A_{\alpha_i}}(\alpha_i)\}, i = 1, 2. \quad (5)$$

Предположим далее, что $\tilde{y} = \tilde{f}(\alpha_1, \alpha_2, t)$ это F -функция, характеризующая нормальное функционирование агрегата при заданной норме $y \geq r$, где r – величина риска предела состояния. При значениях $y < r$ агрегат будет считаться выработавшим свой ресурс и ремонтироваться за время dt (рис. 5).

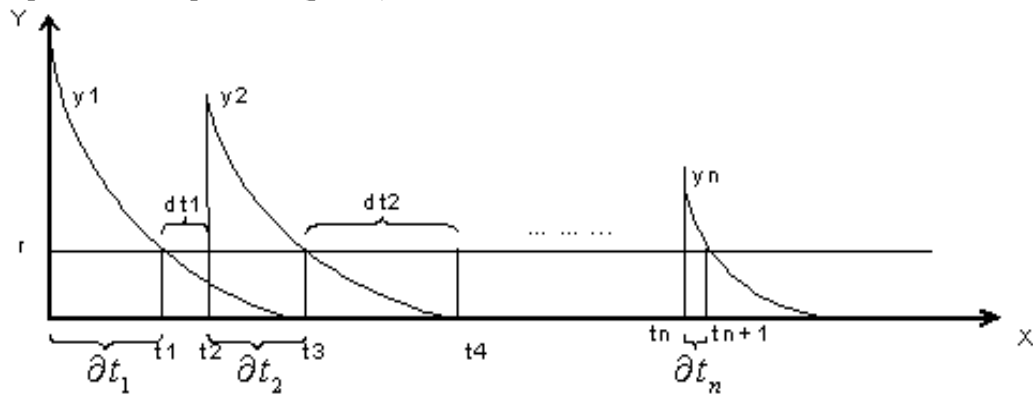


Рис. 5.

Тогда имеем

$$\begin{aligned} dt_1 &\leq dt_2 \leq \dots \leq dt_n \leq \dots, \\ \partial t_1 &\geq \partial t_2 \geq \dots \geq \partial t_n \geq \dots, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\partial t_n = t_n - t_{n-1}$ – интервал функционирования агрегата при заданной норме; $dt_n = t_{n+1} - t_n$ – интервал времени ремонта агрегата.

Этот эффект, в основном, связан с процессом износа элементов и влиянием ухудшающих факторов на состояние агрегата.

Накладывая это условие (6) на конкретный агрегат, можно предложить следующую физическую интерпретацию: после выработки ресурса элементов агрегат ремонтируется, однако, качество его функционирования будет несколько хуже. При этом рассматривается вариант, когда ремонт выполняется без каких-либо усовершенствований конструкции. Это может увеличить интервал функционирования, что, в свою очередь, будет противоречить условию (6); иными словами, агрегат или ремонтируется или изношенные элементы заменяются новыми.

Очевидно, что размытые функции $\tilde{y}^1, \tilde{y}^2, \dots, \tilde{y}^n$ взаимосвязаны некоторым отношением:

$$\tilde{y}^{n+1} = \psi_n(r_{T_n}), \quad \min_t \tilde{y}^n = r_{T_n}, \text{ где } T_n = \partial t_n \quad (7)$$

Теперь рассмотрим нашу задачу с другой позиции.

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ИНТЕРВАЛА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АГРЕГАТА

Необходимо найти такой интервал функционирования агрегата, что

$$\begin{aligned} \partial t_n &\rightarrow \inf, \\ \partial t_n &\leq dt_\zeta \end{aligned} \quad (8)$$

где dt_ζ - заданное время ремонта, т.е. из множества интервалов функционирования $\partial t_1, \partial t_2, \dots, \partial t_n, \dots$ найдем такой интервал ∂t_n , после которого во всех случаях агрегат отремонтируется за время $dt_n > dt_\zeta$.

Таким образом, при данной постановке задачи в качестве количественного показателя долговечности технических систем принимается такое время, после которого на ремонт агрегата затрачивается времени больше заданного. Это означает, что состояние агрегата считается предельным.

4. Общее решение поставленной задачи

Строится функция принадлежности $\mu(dt_n)$, $\mu(dt_n \leq dt_\zeta)$, где $\mu(dt_n) = \mu(dt_n \leq dt_\zeta)$ — условная функция принадлежности [5, 8].

Тогда решение задачи (7), (8) имеет вид

$$d_m = \max_n \{ \mu(\partial t_n) \wedge \mu(dt_n) \}. \quad (9)$$

В результате, долговечность турбоагрегата будет определяться по модели

$$D = \sum_{i=1}^m (\partial t_i + dt_i). \quad (10)$$

Пример. Для стратегии обслуживания агрегата по предложенной методике (рис. 5) заданы следующие условия: $r = 0,3$; $dt_\zeta = 64$ ч и $\min y^n = r_{T_n}$.

Тогда для определения $\min_t \tilde{y}^n = r_{T_n}$, где $T_n = \partial t_n$, используем модельные уравнения из решения поставленной задачи: $\{\partial t_n / \mu(\partial t_n)\}$, $\{(dt_n \leq dt_\zeta) / \mu(dt_n \leq dt_\zeta)\}$, в которых функции принадлежности будут определяться соответственно заданной стратегии ремонтов на интервале времени

$$\begin{cases} \mu(\partial t_n) = 0, & \text{если } \partial t_n \notin [8000, 20000] \\ \frac{\partial t_n}{8000 + \partial t_n}, & \text{если } \partial t_n \in [8000, 20000] \end{cases}$$

и

$$\begin{cases} \mu(dt_n) = 0, & \text{если } dt_n \notin [8, 64] \\ \frac{dt_n}{dt_\zeta + 8}, & \text{если } 8 \leq dt_n \leq 64, \end{cases}$$

Далее, используя уравнения (9) и (10), получим в результате:

$$d_7 = 0,56; \quad D = \sum_{i=1}^7 (\partial t_i + dt_i) = 107180 \text{ ч} \cong 12 \text{ лет}.$$

Таким образом, при выбранной стратегии техобслуживания агрегат может проработать без остановки на капитальный ремонт 12 лет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана для внедрения в отрасль новая методология моделирования задачи функциональной диагностики, которая была апробирована на отдельных энергоустановках. При этом в новой постановке оценочных показателей используются известные прикладные методы классической теории принятия решений. В такой интерпретации проблема поставлена впервые как новая парадигма плохо формализуемых задач диагностики с приложением для теплоэнергетики. В качестве примера рассмотрена процедура принятия нечеткого решения оценивания состояния по полученным диагнозам на функционирующей энергоустановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 27002 – 89.** Надежность в технике. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1989. – 30С.
2. **Надежность технических систем.** Справочник. //Под ред. И.А. Ушакова. - М.: Радио и связь, 1985. – 608С.
3. **Zadeh L. A. Fuzzy sets.** // Information and control. - 1965.V.8, No.3.-P.338-353.
4. **Заде Л.** Понятие состояния в теории систем.//Сб. Общая теория систем. Под ред. М. Месаровича.- М.: Мир, 1966. – С.49 – 65.
5. **Заде Л.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. – 167С.
6. **Гусев Л.А., Смирнова И.М.** Развитие теории размытых множеств.//Измерение. Контроль. Автоматизация. - 1978, №3. – С.39 – 47.
7. **Негойце К.В. и др.** Проблема оптимизации в размытых условиях. //Автоматика и телемеханика. – 1978, №3. – С.121 – 130.
8. **Беллман Р., Заде Л.** Принятие решений в расплывчатых условиях. //Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. – С. 172-215.

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЗНАНИЙ СТУДЕНТОВ НА БАЗЕ ВИКТОРИННОГО МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ

Кузнецов С. В.

*Московский энергетический институт (технический университет)
студент кафедры «Автоматизированных систем управления тепловыми процессами»,
науч. рук. доц. Зверьков В.П.*

Аннотация

Представлен программный комплекс для проведения централизованного компьютерного тестирования студентов по изучаемой дисциплине для определения уровня полученных знаний. Используется викторинный способ обучения и контроля и студентов с возможностью сбора статистических данных тестирования по сети.

Данный программный комплекс предназначен для проведения компьютерного тестирования студентов в формате викторины, где нужно согласиться или нет с некоторым утверждением. При этом ведётся статистика прохождения тестов студентами, а именно: название теста, группа, ФИО, дата и время прохождения теста, количество попыток, время, затраченное на одну попытку, а также общее, и т.д. Вся статистика записывается в специальную базу данных (БД), расположение которой можно настроить, причём можно использовать сетевые пути. Это позволяет использовать отдельную машину для сбора статистики со всего компьютерного класса. Для доступа к БД разработана отдельная программа-клиент, выводящая статистику, а также позволяющая редактировать конфигурационный файл для тестирующего клиента. В целях безопасности, рекомендуется хранить её, например, на флэш-накопителе, который доступен только лицу, которое проводит тестирование. Чтобы просмотреть статистику, достаточно будет подключить флэш-накопитель к главной машине и открыть БД.

С технической стороны, программный комплекс состоит из трёх модулей, это – тестирующий клиент, доступный для испытуемых, программа для просмотра БД статистики и редактирования конфигурационного файла, а также редактор тестов. Несколько слов о каждой, из составляющих данного комплекса. Тестирующий клиент, как следует из названия, предназначен для прохождения теста студентами. Для начала тестирования необходимо ввести группу и ФИО, далее выбрать тест. Во время тестирования есть возможность начать тест заново. По окончании теста, выводится некоторая статистика, а именно: время затраченное на прохождение теста, количество попыток и количество верных ответов. Клиент имеет определённую защиту от подделки результатов прохождения тестов.

О втором компоненте – программе для просмотра статистики упоминалось выше, поэтому рассмотрим третий составляющую – редактор тестов. Редактор тестов позволяет создавать файлы с вопросами, в которых можно указать название теста, автора и комментарии к тесту.

А.Н. Лесничук, Г.П. Плетнев, Д.В. Галайда

Московский Энергетический Институт (Технический Университет)

СИСТЕМА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ЭКРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА В ТОПКЕ БАРАБАННОГО КОТЛА

Рассматривается математическая модель сигнала по тепловосприятию топочных экранов парового барабанного котла, устанавливающая связь между полезным напором естественной циркуляции, измеряемым с помощью штатной аппаратуры, и теплонапряженностью контролируемого экрана. Показано, что предлагаемый косвенный метод оценки состояния экранных поверхностей нагрева может быть использован в решении задач оперативного технического диагноза, связанного с надежностью работы котла в целом.

В настоящее время на тепловых электростанциях находится в эксплуатации большое количество барабанных паровых котлов различных типов и модификаций. Обеспечение их надежной безаварийной эксплуатации во многом определяется состоянием теплонапряженных поверхностей нагрева. В первую очередь это топочные экраны и пароперегреватель, надежная работа которых зависит от большого числа конструктивных и эксплуатационных режимных факторов. Расположение факела горящего топлива в топочном объеме таких котлов определяет наличие или отсутствие неравномерностей температур и газового состава, а следовательно, неравномерностей плотности теплового потока по ширине, глубине и высоте топки.

Длительные перекосы факела и неравномерности поля температур, наблюдаемые в эксплуатации пылеугольных и газо-мазутных барабанных котлов, могут привести к нежелательным последствиям: ухудшению экономичности процесса горения, повреждению экранов и отдельных труб. Поэтому система диагностики экранных поверхностей, построенная на основе сигнала по тепловосприятию топочных экранов, обладающая простотой технической реализации, наглядностью и оперативностью отображения информации, является актуальной и перспективной для внедрения [1].

В настоящей статье приводятся результаты испытаний системы технической диагностики (СТД) на котле типа ТП-87 паропроизводительностью 420 т/ч, работающего на смеси топлив (уголь, газ, мазут), с параметрами пара на выходе: давление $p_0 = 14$ МПа, температура $t_0 = 545$ °С.

Физическая модель контура естественной циркуляции и принципы формирования сигнала по тепловосприятию показаны на рис.1.

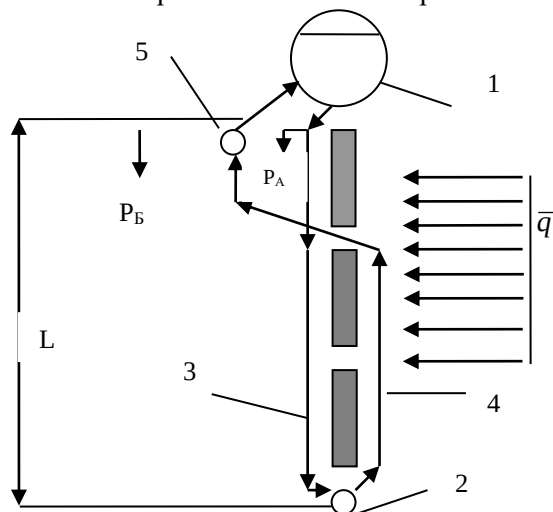


Рис.1. Физическая модель контура естественной циркуляции:

1 – барабан; 2 – нижний коллектор; 3, 4 – опускная и подъемная трубы; 5 – верхний сборный коллектор; L – расстояние от нижнего коллектора до места отбора сигналов в опускной трубе P_A и подъемной P_B трубах; $\bar{q}$ – действующий тепловой поток.

Основные элементы контура естественной циркуляции: опускная не обогреваемая труба, где движется вниз вода; нижний коллектор, откуда поступившая вода распределяется по парообразующим трубам; подъемная обогреваемая труба; паро-сборный коллектор; пароотводящие трубы. В верхнюю часть опускной трубы и в пароотводящую трубу врезаны импульсные трубки для измерения давлений.

Сигнал по тепловосприятию топочных экранов (далее разность давлений $p_A - p_B$) зависит от целого ряда факторов, в частности от интенсивности обогрева экранных труб. Эта разность определяет паросодержание пароводяной смеси и служит источником движущего напора естественной циркуляции.[2]

Неравномерное распределение общего количества теплоты, образующейся при

сжигании органических топлив в топках барабанных паровых котлов между экранными поверхностями нагрева может быть обусловлено различными режимами работы тепломеханического оборудования (нагрузки, вида сжигаемого топлива, работы горелочных устройств, процентного соотношения сжигаемой смеси топлив и т.д.), наличием переходных режимов, а также наличием внешних неконтролируемых возмущений (присосы воздуха, изменение количества топлива и т.д.).

Все это, в целом, способствует перекосам факела и созданию в экранных поверхностях нагрева участков повышенного термического напряжения, что в свою очередь, приводит к сокращению расчетного срока службы металла труб и может привести к аварийному останову оборудования с последующим дорогостоящим восстановительным ремонтом.

Задача системы технической диагностики (СТД) с использованием сигнала по тепловосприятию топочных экранов, состоит в том, чтобы используя предлагаемый сигнал, оценивать текущее и интегральное тепловосприятие экранов топки за прошедший с момента выхода котла из ремонта отрезок времени.

Используя данную информацию машинист котла, перераспределяя подачу топлива по горелкам, может уравнивать распределение тепловой нагрузки на экранные поверхности и исключить неравномерность обогрева труб как в темпе с процессом горения, так и за достаточно большой промежуток времени.

Как было отмечено выше, интенсивность теплового потока, падающего на парообразующую поверхность, зависит от положения факела в топке. Ввиду этого сигнал по разности давлений может быть использован для регулирования положения факела в топке, т.е. выравнивания поля тепловых потоков по сечению топочной камеры.

Такое выравнивание необходимо с точки зрения обеспечения надежности работы парообразующих труб. Ввиду этого обстоятельства выравнивание поля тепловых потоков служит одной из важнейших составляющих общей задачи по обеспечению надежности оборудования. Отборные устройства для измерения статического напора P_B устанавливаются на пароперепускных трубах между сборными коллекторами подъемных труб средних боковых панелей и барабаном. Отборные устройства для измерения полного напора P_A представляют собой импульсные трубки, заведенные до центра внутрь опускных труб средних боковых панелей и обращенные навстречу потоку. Трубки устанавливаются на расстоянии 1200 мм от днища барабана.

Измеренные и преобразованные сигналы по перепадам давлений на циркуляционных контурах панелей котла выводят на монитор отображения информации программно – вычислительного комплекса «Квинт».

Разработанный алгоритм позволяет отслеживать положение ядра факела в топке котла, оценивать тепловосприятие боковых экранных поверхностей нагрева в темпе с технологическим процессом преобразования в паровом котле, как в текущий момент так и в заданный промежуток времени, используя данные архива (час, сутки и т.д.).

На рис.2 приведены точки отбора перепадов давлений из циркуляционных контуров по периметру топочного пространства и расположения горелок в топке.

Испытания системы технической диагностики положения ядра факела в топке барабанного парового котла, задача которых состояла в установлении зависимости тепловосприятия экранных поверхностей нагрева в топке от количества и комбинации работающих горелок, проводились при следующих условиях: паровая нагрузка котла 455 т/ч, расход газа на котел = 291000 м.куб/ч.

Отладка опытного образца СТД проводилась путем поочередного отключения и включения горелок при условии неизменного суммарного тепловыделения в топке котла.

При отключении горелок общий расход газа на котел поддерживался постоянным путем увеличения расхода газа на работающие горелки, в результате чего общее тепловыделение в топке оставалось неизменным.

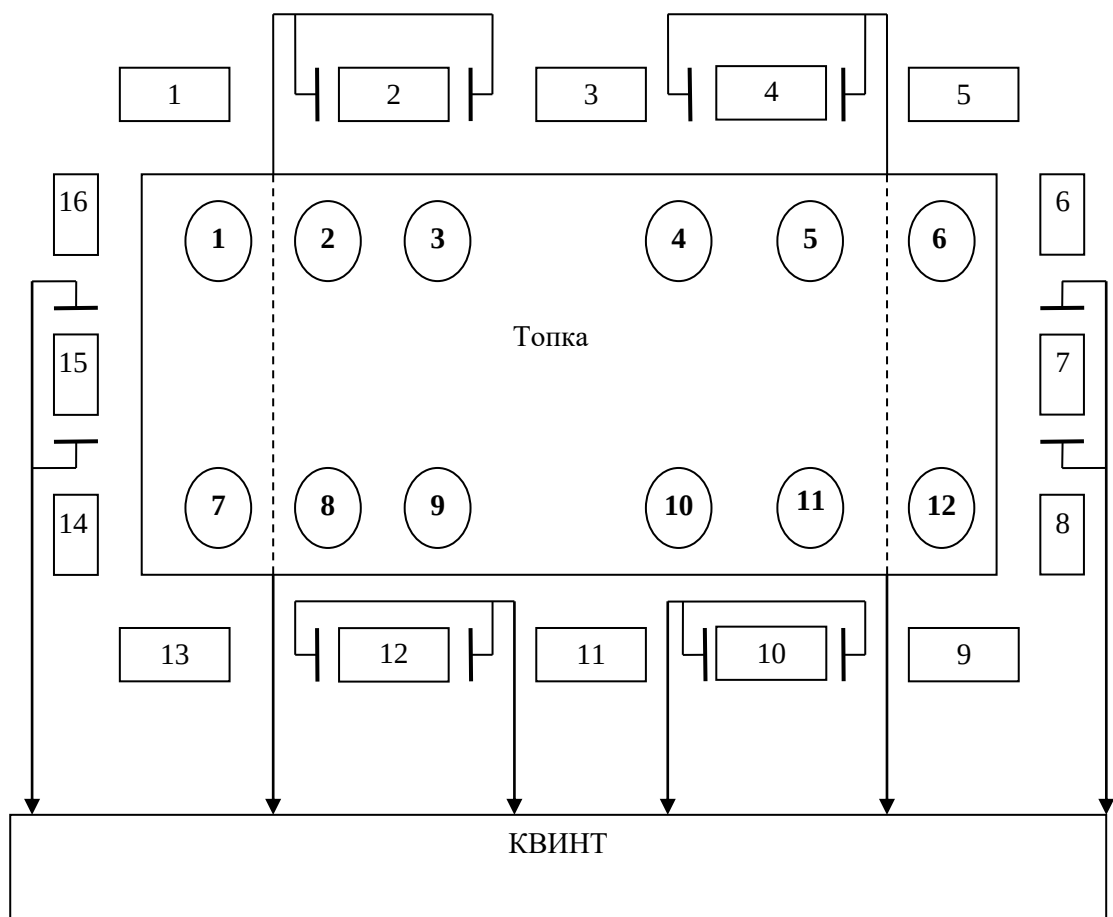
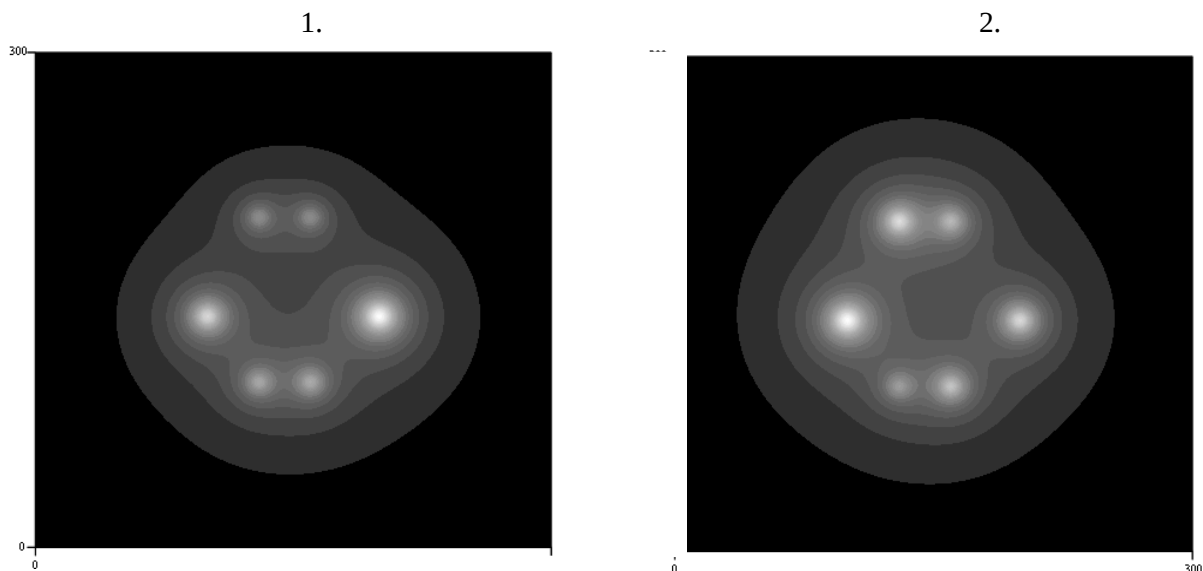


Рис.2. Схема расположения точек отбора перепадов давлений из циркуляционных контуров по периметру топочного пространства и расположения горелок в топке: **1,2...12** – номера горелок; **1,2...16** – номера экранных панелей.

Результаты опытного включения СТД на котле ТП-87 приведены на рис.3. На рисунке показана качественная картинка сигналов по тепловосприятию топочных экранов в зависимости от положения факела в топке по отношению к экранам.



3.

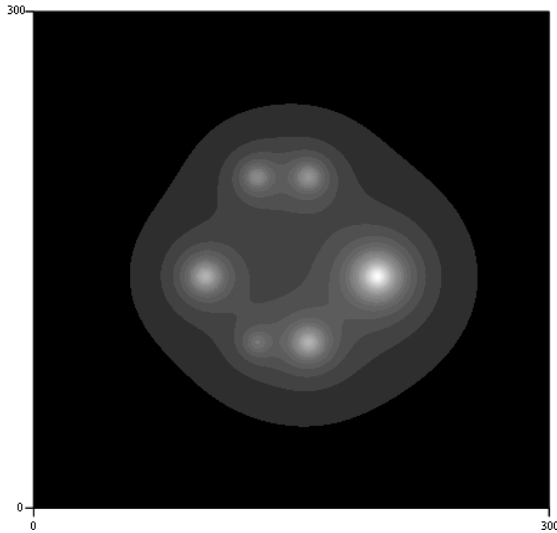


Рис.3. Результаты включения системы технической диагностики: 1 – нормальный режим (работают все горелки); 2 – отключение горелки №10; 3 – отключение горелки №8.

Преимущество сигнала – изображения, как известно, в том, что он не нуждается в декодировании, а следовательно, требует меньше времени на осмысление и реакцию наблюдателя. Это ведет в свою очередь к повышению надежности и эффективности системы технической диагностики состояния топочных экранов в целом.

Заключение

Рассмотренный сигнал по тепловосприятию топочных экранов, оценивающий тепловыделение в топке, зависит от положения ядра факела в топке котла, а так как в режиме нормальной эксплуатации с постоянной паровой нагрузкой имеет место значительное смещение ядра факела из-за различия расходных характеристик горелочных устройств, то использование сигнала по тепловосприятию топочных экранов позволяет определить положение ядра факела по ширине и глубине топки котла и при необходимости скорректировать это положение.

Сигнал по тепловосприятию топочных экранов реализуется на серийных технических средствах измерения, сравнительно прост, надежен, удобен в эксплуатации, обладает высокой чувствительностью, имеет малую инерционность, характеризуемую запаздыванием $\tau = 10\text{с}$ и постоянной времени $T_0 = 100\text{с}$ и не имеет аналогов в решении задач технической диагностики теплонапряженных экранных поверхностей нагрева в топке парового барабанного котла.

В перспективе систему технической диагностики на базе КВИНТа с сигналом по тепловосприятию топочных экранов, выполняющую чисто информационные функции, можно развить, дополнив управляющими функциями, например, по автоматической паровой обдувке экранных поверхностей, подверженных шлакообразованию, для котлов, работающих на твердом топливе или смеси топлив (газ, мазут, уголь).

Практическая значимость полученных моделей также вполне очевидна, поскольку перепад давления в циркуляционном контуре котла (его абсолютное значение, первая и вторая производная по времени) может измеряться непрерывно с помощью обычных технических средств и использоваться в решении задач оперативного технического диагноза и прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Использование сигнала по тепловосприятию топочных экранов для оценки теплонапряженности поверхностей нагрева барабанного котла/ А.Н. Лесничук, В.А. Лошкарев, Г.П. Плетнев, А.С. Горбачев, А.Н. Поляков//Вестник МЭИ. 1999.№3. с.56-59
2. Регулирование тепловой нагрузки барабанного парового котла с использованием сигнала по тепловосприятию топочных экранов / Г.П. Плетнев, А.Н. Лесничук, А.Н. Шелихов, В.И. Ковеленов // Теплоэнергетика. 1981. №6. С. 53-57

Использование тренажера энергоблока Т-250 для исследования и оптимизации режимов участия блока в регулировании частоты и мощности в энергосистеме

К. С. Матвиенко, асп.; рук. Э. К. Аракелян, проф., д.т.н. (МЭИ)

Московский энергетический институт

Как известно, анализ и совершенствование режимов работы оборудования тепловых электрических станций и методы управления этими режимами являются важнейшим аспектом эксплуатации тепловых электростанций. В течение многих лет основным источником информации о статических и динамических характеристиках оборудования был эксперимент на действующем оборудовании. Альтернативой экспериментальному подходу к анализу и совершенствованию режимов и методов управления ими являются расчетные методы и их высшая реализация: вычислительная модель. А компьютерная революция сделала реализуемой задачу построения достаточно полной и представительной вычислительной модели процессов энергоблока (станции) [1].

Общеизвестно, что работа теплофикационных энергоблоков СКД в режиме скользящего (комбинированного) регулирования имеет значительные преимущества по сравнению с работой на постоянном давлении. Кроме того, такие энергоблоки менее инерционны, и при работе на частичных нагрузках имеют запас по получению дополнительной электрической мощности, с одновременным обеспечением заданной тепловой нагрузки. Это делает возможным участие этих энергоблоков в регулировании частоты и мощности энергосистемы. Для отладки перехода энергоблока из режима регулирования с постоянным давлением в скользящее и наоборот, а также для создания и отработки системы регулирования, которая обеспечит возможность форсировки блока по нагрузке при скользящих параметрах необходимы значительное количество натурных экспериментов, что, как правило, в условиях рыночной экономики невозможно.

Вместе с тем в настоящее время большое внимание в энергетике уделяется тренажерам, т.е. программным продуктам, в той или иной степени воспроизводящим управление определенным технологическим объектом.

Тренажеры могут применяться для:

- обучения и повышения квалификации оперативного персонала, управляющего работой оборудования; привитие ему навыков эксплуатации и наиболее эффективного использования оборудования, способности быстро и адекватно действовать в условиях чрезвычайной ситуации; проведения соревнований между операторами станций; обучения работы с ПТК до его внедрения на объекте;
- проектирования, отладки и тестирования устройств (систем) автоматического управления оборудованием;
- проведения активных экспериментов; анализа и отработки режимов работы оборудования и корректировки на этой основе проектных решений по вновь строящимся энергоблокам, совершенствования на этой основе эксплуатационных инструкций, оптимизации основных статических режимов;
- получения дополнительной информации об объекте.

Наши исследования проводились на хорошо зарекомендовавших себя тренажерах энергоблока Т-250, установленных в тренажерном центре кафедры АСУТП.

В результате был разработан алгоритм автоматической разгрузки энергоблока с турбиной Т-250 и двухкорпусным котлом ТПП-210А при его работе по комбинированной программе регулирования. Также была разработана схема регулирования энергоблока с турбиной Т-250/300-240 и котлом ТГМП-314 при его участии в регулировании частоты и мощности энергосистемы и установлено, что при работе блока в теплофикационном режиме для его форсировки оптимально воздействовать на регулирующие клапаны байпаса группы ПВД, паровой турбины и топлива.

Тем самым была доказана практическая возможность применения тренажеров для решения научных, исследовательских и производственных задач. От тренажера лишь требуется выполнение двух обязательных требований:

- адекватность реальному объекту в рамках поставленной задачи;
- условия проведения экспериментов должны быть близки к реальным.

Работа будет продолжаться в части выбора оптимальных режимов участия энергоблока в регулировании частоты и мощности в энергосистеме по критериям экономичности и надежности и разработки конкретных рекомендаций по практическому их внедрению на электростанциях ОАО «Мосэнерго».

Литература.

1. Рубашкин А. С. Компьютерное моделирование тепломеханических процессов энергоблоков, работающих на органическом топливе. Дисс. на соискание ученой степени докт. техн. Наук.- М.: МЭИ, 2005.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ И НАСТРОЙКЕ ФАЗЗИ-КОНТРОЛЛЕРА

АННОТАЦИЯ

Предлагается метод разработки фаззи-контроллера типа Такаги–Сугено, в котором гарантируется определенный запас устойчивости. Контроллер рассматривается как классический ПИ-контроллер с переменными параметрами k_p и k_i , область изменения которых определена и ограничена. Предлагается метод настройки фаззи-контроллера, в котором зона изменения параметров k_p и k_i может быть выбрана внутри зоны, определенной границами необходимого запаса устойчивости в плоскости k_p – k_i . На примере объекта третьего порядка проводится сравнение между предложенным фаззи-контроллером и классическим ПИ-контроллером с настройкой, обеспечивающей определенный запас устойчивости и минимизирующей заданную целевую функцию.

1. ВВЕДЕНИЕ

Прогресс в технологии привел к появлению сложных многофункциональных динамических систем. Управлять такими сложными системами на базе традиционных алгоритмов зачастую трудно. Чтобы достичь желаемых результатов работы требуются современные системы управления. Фаззи- (нечеткое) управление – один из перспективных алгоритмов управления особенно для сложных, нелинейных систем и систем с нечеткими математическими моделями. Начиная с момента появления в 1965 г. [1] фаззи-управление достаточно хорошо исследовано и нашло широкое применение на практике [2–5]. Кроме того, существует тенденция рассматривать фаззи-управление как альтернативу традиционным контроллерам в управлении технологическими процессами и в научных приложениях [6, 7]. Однако главным недостатком фаззи-контроллера остается отсутствие эффективных методов его настройки и анализа устойчивости. Самый общий метод настройки фаззи-контроллера – это метод проб и ошибок [6, 7], занимающий много времени и существенно зависящий от опыта проектировщика. В [5, 8] приведены два примера использования алгоритмов оптимизации для настройки фаззи-контроллера типа Мамдани.

Большинство предложенных в литературе фаззи-контроллеров не имеет никакой гарантии устойчивости из-за трудностей ее анализа. Однако существуют некоторые исследования, посвященные устойчивости фаззи-контроллеров. В [4] фаззи-контроллер рассматривается как нелинейный I -контроллер с переменным параметром и используется известный метод Попова для исследования устойчивости нелинейных систем. В [9] фаззи-контроллер заменяется рядом линейных

контроллеров, после чего для ограничения параметров каждого контроллера используется метод Рауса–Гурвица.

В настоящей работе предлагается метод разработки фаззи-контроллера типа Такаги–Сугено с настройкой, гарантирующей запас устойчивости и в то же время удовлетворяющей другим требованиям работы системы.

2. КОНТРОЛЛЕР ТАКАГИ–СУГЕНО

Общая структура правила Такаги–Сугено для двух входных переменных x , y и одной выходной переменной z имеет вид:

Если « x есть A » И « y есть B », То « $z = f(x, y)$ », (1)

где f – функция, связывающая входные переменные x и y ; A и B – лингвистические термы. Если эту функцию выбрать линейной, правило (1) может быть переписано следующим образом

Если « x есть A » И « y есть B », То « $z = ax + by + c$ », (2)

где a , b , и c – константы.

Для входных переменных обычно используют рассогласование e и его производную de . Для выходной переменной выбор зависит от типа контроллера. Для фаззи ПИ-контроллера выходная переменная – производная управляющего сигнала du , а для фаззи ПД-контроллера – управляющий сигнал u . В этой работе остановимся на фаззи ПИ-контроллере, однако метод применим и к фаззи ПД-, ПИД- контроллерам.

Условие (2) может быть переписано следующим образом

Если « e есть A » И « de есть B », То « $du = ae + bde + c$ » (3)

Если выбрать константу c равной нулю, тогда (3) фактически представляет традиционный ПИ-контроллер с k_i вместо a и k_p вместо b . Это означает, что каждое правило в фаззи-контроллере работает как традиционный ПИ-контроллер.

Предположим, что фаззи-контроллер имеет n правил (рис.1). На рисунке μ_{An} и μ_{Bn} являются значениями функции принадлежности для входных переменных e и de ; ω_n – результат n -го правила (также называется силой правила); du_n – выходная переменная n -го правила. Набор правил следующий:

Если « e есть A_1 » И « de есть B_1 », То « $du_1 = k_{i1}e + k_{p1}de$ »;
Если « e есть A_2 » И « de есть B_2 », То « $du_2 = k_{i2}e + k_{p2}de$ »;

...

Если « e есть A_n » И « de есть B_n », То « $du_n = k_{in}e + k_{pn}de$ » (4)

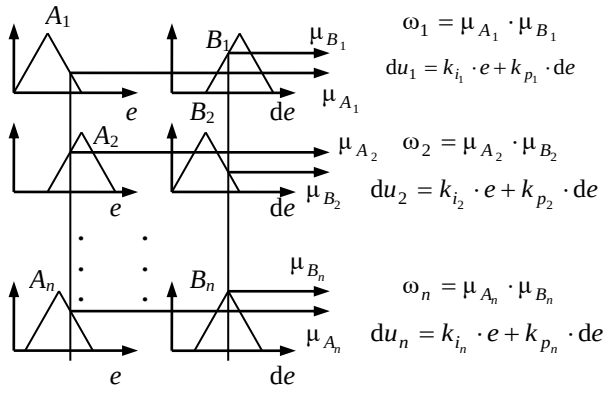


Рис. 1. Структура контроллера Такаги-Сугено

Теперь, используя метод взвешенного среднего как метод дефаззификации, можно вычислить значение управляющего сигнала du следующим образом:

$$du = \frac{\omega_1 \cdot du_1 + \omega_2 \cdot du_2 + \dots + \omega_n \cdot du_n}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n}. \quad (5)$$

После подстановки (4) в (5) получим

$$du = k_i \cdot e + k_p \cdot de, \quad (6)$$

где $k_i = \frac{\omega_1 \cdot k_{i1} + \omega_2 \cdot k_{i2} + \dots + \omega_n \cdot k_{in}}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n}$;

$$k_p = \frac{\omega_1 \cdot k_{p1} + \omega_2 \cdot k_{p2} + \dots + \omega_n \cdot k_{pn}}{\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n}. \quad (7, 8)$$

Из уравнений (7) и (8) следует, что контроллер будет интерполяцией нескольких классических линейных ПИ-контроллеров, над каждым из которых доминирует одно правило. Другими словами, фаззи-контроллер типа Такаги-Сугено фактически является классическим ПИ-контроллером с параметрами k_p и k_i гладко сынтегрированными между n линейными контроллерами. Можно также заметить из уравнений (7) и (8), что, если параметры контроллера ($k_{p1,2,\dots,n}$, $k_{i1,2,\dots,n}$) во всех правилах одинаковые, то фаззи-контроллер будет иметь единственное значение k_p и k_i и будет эквивалентен линейному классическому ПИ-контроллеру. Это означает, что классический ПИ-контроллер может быть получен из фаззи-контроллера как частный случай.

Вышеизложенные выводы являются корректными независимо от числа и формы функций принадлежности входных переменных e и de . Однако, для простоты, используем три функции принадлежности для каждой входной переменной (рис.2). В этом случае будет девять правил (таб. 1). Для симметричного контроллера параметры k_p и k_i в правилах 9 и 1 должны быть одинаковыми, и также в правилах 8 и 2, 7 и 3, 6 и 4. Это означает, что девять значений k_p и k_i будут сокращены до пяти.

Из сказанного выше можно заключить следующую-

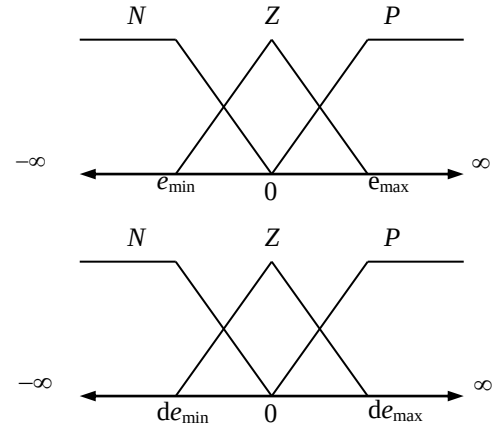


Рис. 2. Функции принадлежности

Таблица 1. База правил предложенного контроллера

Правило	e	de	du
1	N	N	$du_1 = k_{i1}e + k_{p1}de$
2	N	Z	$du_2 = k_{i2}e + k_{p2}de$
3	N	P	$du_3 = k_{i3}e + k_{p3}de$
4	Z	N	$du_4 = k_{i4}e + k_{p4}de$
5	Z	Z	$du_5 = k_{i5}e + k_{p5}de$
6	Z	P	$du_6 = k_{i6}e + k_{p6}de$
7	P	N	$du_7 = k_{i7}e + k_{p7}de$
8	P	Z	$du_8 = k_{i8}e + k_{p8}de$
9	P	P	$du_9 = k_{i9}e + k_{p9}de$

щее.

- Предложенный контроллер имеет математическую модель

$$du = k_i(e, de) \cdot e + k_p(e, de) \cdot de \quad (9)$$

для $-\infty < e < \infty$ и $-\infty < de < \infty$.

- Параметры контроллера $k_p(e, de)$ и $k_i(e, de)$ интерполируются между пятью значениями (k_{p1}, k_{i1}), (k_{p2}, k_{i2}), (k_{p3}, k_{i3}), (k_{p4}, k_{i4}), (k_{p5}, k_{i5}). Рис. 3 показывает пример возможной зоны изменения параметров $k_p(e, de)$ и $k_i(e, de)$ в плоскости k_p - k_i , когда значения e и de изменяются от $-\infty$ до ∞ .
- Если параметры контроллера во всех правилах являются одинаковыми, то значения $k_p(e, de)$ и $k_i(e, de)$ будут константами (см. уравнения (7) и (8), и контроллер будет эквивалентен классическому ПИ-контроллеру.
- Значения (e_{min}, e_{max}) и (de_{min}, de_{max}) определяют диапазоны, в которых параметры контроллера k_p и k_i интерполируются между различными значениями. Вне этих диапазонов параметры контроллера являются константами.

3. АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ФАЗЗИ-КОНТРОЛЛЕРА

Большинство предложенных в литературе фаззи-

контроллеров не имеет никакой гарантии устойчивости из-за трудности ее анализа. Однако чтобы применить фаззи-контроллер в промышленных приложениях, обеспечить определенный запас устойчивости нужно. Для линейных систем теория устойчивости обращается в алгебраический анализ местоположения корней характеристического уравнения модели. Если все корни расположены в левой половине комплексной плоскости, тогда система устойчива. Для нелинейных систем понятие устойчивости более сложно. Обычно для анализа устойчивости в нелинейных системах используются функции Ляпунова или метод Попова. В этой работе представлен новый подход к анализу устойчивости системы, управляемой фаззи-контроллером с использованием линейной теории управления.

Из уравнения (9) очевидно, что предложенный контроллер Такаги–Сугено является, в сущности, классическим ПИ-контроллером с переменными параметрами $k_p(e, de)$ и $k_i(e, de)$. Однако, изменение параметров ограничено пятью значениями k_p и k_i , как это видно из рис. 3. Исходя из этого, подходы к определению границ устойчивости линейной системы могут быть применены и к фаззи-контроллеру с единственным отличием, что параметры контроллера зависят от e и de . Для того чтобы система управления была устойчивой, k_p и k_i должны удовлетворять критериям устойчивости для всех значений e и de . Другими словами, область изменения k_p и k_i должна быть расположена в границах устойчивости.

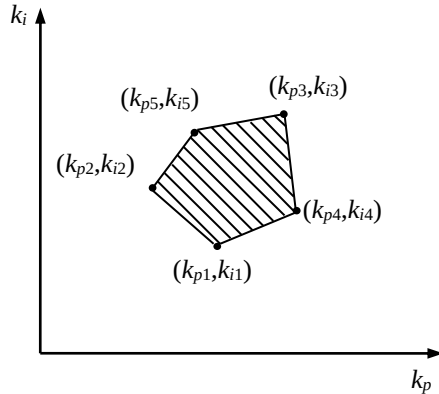


Рис. 3. Пример возможной зоны изменения параметров контроллера

Определим запас устойчивости, используя корневой показатель колебательности m [10], хотя применимы также и другие методы. Рассмотрим типичную систему управления с отрицательной обратной связью (рис. 4). Характеристическое уравнение этой системы может быть записано в следующем виде

$$1 + W_p(s)W_m(s) = 0, \quad (10)$$

где $W_p(s)$ – передаточная функция контроллера; $W_m(s)$ – передаточная функция объекта. Требуется, чтобы все корни характеристического уравнения были рас-

положены в левой половине комплексной плоскости.

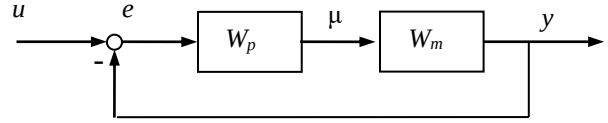


Рис. 4. Система управления с отрицательной обратной связью

Также требуется, чтобы все комплексные корни имели $m \geq m_{\text{req}}$ и $\alpha \geq \alpha_{\text{req}}$, где m_{req} – минимальный необходимый корневой показатель колебательности, α – действительная часть комплексного корня. Рис. 5 показывает область в комплексной плоскости, где

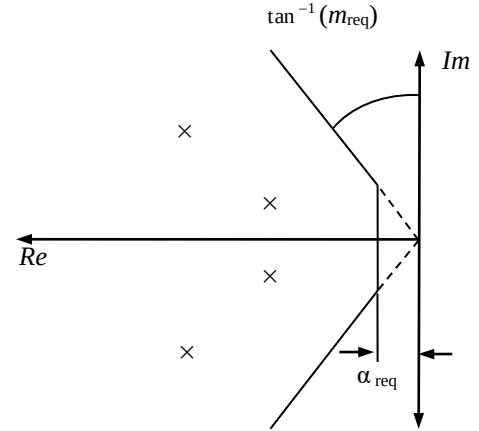


Рис. 5. Область расположения корней характеристического уравнения

должны быть расположены корни характеристического уравнения.

Для ПИ-контроллера

$$W_p(s) = k_p + k_i / s \quad (11)$$

и, если корни уравнения (10) должны иметь $m \geq m_{\text{req}}$, то подставляя вместо s в уравнение (10)

$$s = -m_{\text{req}} \omega + j \omega, \quad (12)$$

получим

$$W_m(m_{\text{req}}, j\omega)(k_p + k_i / (-m_{\text{req}} \omega + j\omega)) = -1 \quad (13)$$

Из уравнения (13) получим

$$k_i(\omega) = - \frac{\text{Im}[1 / W_m(m_{\text{req}}, j\omega)]}{\text{Im}[1 / (-m_{\text{req}} \omega + j\omega)]}; \quad (14)$$

$$k_p(\omega) = -k_i(\omega) \text{Re} \left(\frac{1}{-m_{\text{req}} \omega + j\omega} \right) - \text{Re} \left(\frac{1}{W_m(m_{\text{req}}, j\omega)} \right) \quad (15)$$

Из уравнений (14) и (15) можно определить область изменения параметров k_p и k_i , которые гарантируют запас устойчивости, определенный условием $m \geq m_{\text{req}}$. Этот метод можно применить также, чтобы удовлетворялось условие $\alpha \geq \alpha_{\text{req}}$. В этом случае значение s в уравнении (10) заменяется на

$$s = -\alpha_{\text{req}} + j\omega, \quad (16)$$

и в итоге аналогично получаются уравнения для параметров k_p и k_i , которые гарантируют условие $\alpha \geq \alpha_{\text{req}}$.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ

На практике очень часто встречаются системы управления, которые должны эффективно решать задачу по регулированию заданной величины и в то же время минимизировать определенную целевую функцию. В этом случае контроллер должен быть настроен так, чтобы удовлетворялись эти условия. Настроить классический ПИ-контроллер, чтобы удовлетворялись определенные требования с заданным запасом устойчивости, не составляет большого труда. Однако, для фаззи-контроллера это проблематично, что отмечено во многих литературных источниках, так как не ясно отношение между параметрами настройки и границей устойчивости. Для предложенного выше фаззи-контроллера эта проблема решаема и настроить параметры контроллера в области, определенной необходимым запасом устойчивости, возможно. Далее предлагается конкретный объект и сравниваются результаты работы предложенного фаззи-контроллера с классическим ПИ-контроллером.

Рассмотрим объект управления третьего порядка, описываемый передаточной функцией:

$$W_m(s) = \frac{2}{(s+1)(s+1)(s+10)} \quad (17)$$

Предлагается целевая функция формы

$$C = \int_0^t u^2 dt, \quad (18)$$

где u – управляющий сигнал.

Предположим, что система управления должна обеспечить выполнение следующих требований:

1) Поведение системы (ее замкнутого контура) должно иметь следующие характеристики при единичном ступенчатом задании:

- максимальный выброс 20 %;
- максимальное время нарастания 10 сек.;
- максимальное время регулирования 20 сек.

2) Система управления должна минимизировать целевую функцию.

3) Система управления должна обеспечить запас устойчивости, определенный границами $m \geq m_{\text{req}}$ и $\alpha \geq \alpha_{\text{req}}$, как описано в разделе 3. Здесь выбрано $m_{\text{req}} = 0.1671$, и $\alpha_{\text{req}} = 0.12$. Рис. 6 показывает область в плоскости k_p - k_i , настройки в которой гарантируют $m \geq 0.1671$ и $\alpha \geq 0.12$ для указанной системы.

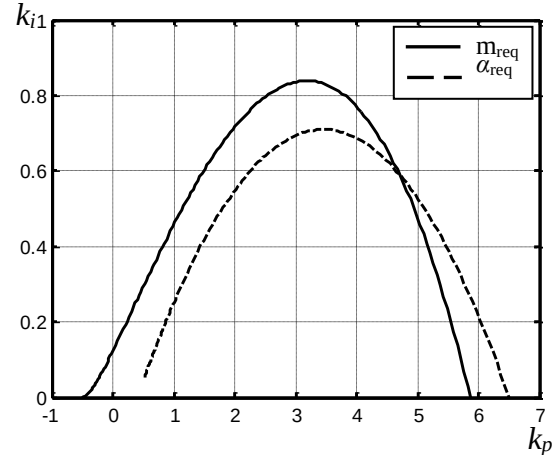


Рис. 6. Область в плоскости k_p - k_i , где гарантируется $m \geq 0.1671$ и $\alpha \geq 0.12$ для указанной системы

4.1 Классический ПИ-контроллер

Чтобы найти параметры контроллера, которые удовлетворяют вышеупомянутым ограничениям, используем известный алгоритм оптимизации "Градиентный спуск" (см. Matlab v.7.3 Mathworks Inc.) Начинается оптимизация с точки в области $m \geq m_{\text{req}}$ и $\alpha \geq \alpha_{\text{req}}$ (см. рис. 6), например $k_p = 2.14$ и $k_i = 0.369$ (эта точка взята из [6]). Рис.7 и таб.2 показывают результаты до и после настройки. Жирные линии на рис.7 показывают необходимые требования поведения системы при единичном ступенчатом задании.

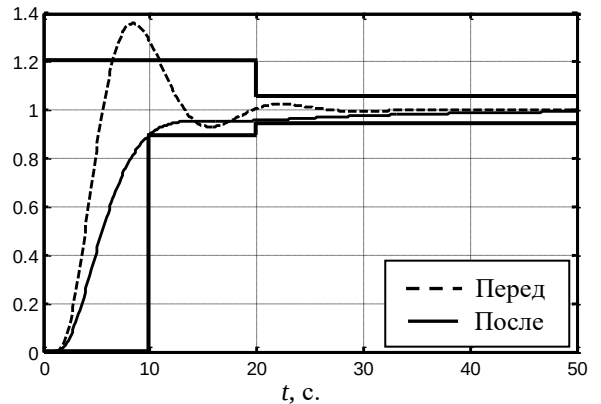


Рис. 7. Поведение системы перед и после настройки классического ПИ контроллера

Таблица 2. Результаты перед и после настройки классического контроллера

	Перед настройкой		После настройки	
	k_p	k_i	k_p	k_i
Параметры контроллера	2.14	0.369	1.109	0.083
Целевая функция	22.51 ($t = 0:20$ сек.)		9.53 ($t = 0:20$ сек.)	
m	0.42		1.12	
α	0.19		0.32	

Очевидно, что после настройки все ограничения соблюдаются. Целевая функция также значительно уменьшена.

4.2 Предложенный фаззи ПИ-контроллер

В отличие от классического контроллера фаззи-контроллер имеет большее число параметров настройки. В предложенном фаззи-контроллере настроим пять значений k_p и k_i , (см. рис.3). Это означает, что фактически имеются 10 параметров настройки. С таким большим объемом настроек оптимизацию лучше начинать с точки, близкой к оптимальному решению особенно, когда используется метод градиентного спуска. Это позволяет избежать получения локального минимума вместо глобального. Начнем поиск настроек с оптимального решения, полученного для классического ПИ-контроллера, т.е.

$$k_{p1,2,3,4,5} = k_{p, \text{класс}}, \quad k_{i1,2,3,4,5} = k_{i, \text{класс}}$$

где $k_{p, \text{класс}}$ и $k_{i, \text{класс}}$ – оптимизированные параметры классического контроллера (1.109 и 0.083 соответственно). В этом случае фаззи-контроллер эквивалентен классическому ПИ-контроллеру. На рис.8 показаны переходные характеристики системы с фаззи- и классическим контроллерами. Как видно, они совпадают друг с другом. Рис.9 демонстрирует поверхность управления для фаззи-контроллера в этом случае.

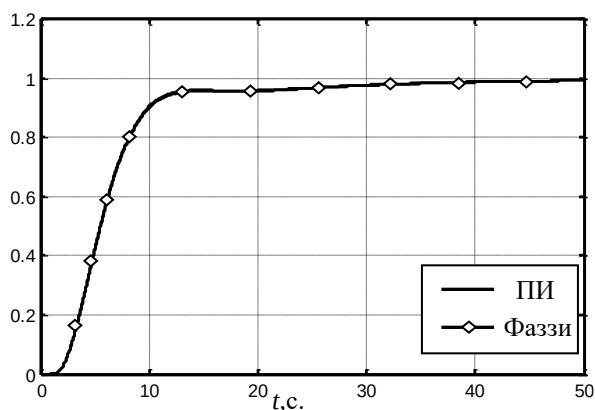


Рис. 8. Переходные характеристики системы с фаззи- и классическим контроллерами в случае эквивалентности

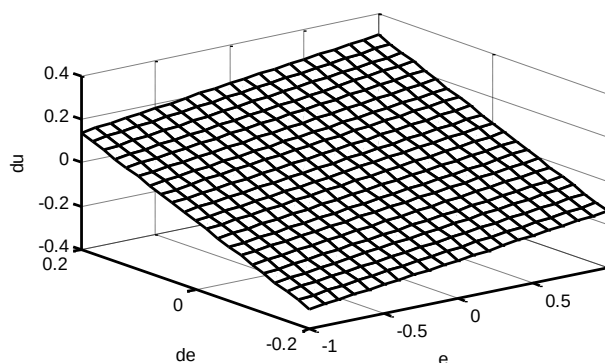


Рис. 9. Поверхность управления фаззи-контроллера в случае эквивалентности

Система управления должна обеспечить те же ограничения, что и в случае классического ПИ-контроллера. В табл.3 сведены результаты до и после настройки фаззи-контроллера, на рис.10 показаны переходные характеристики системы до и после настройки, а рис.11 демонстрирует поверхность управления после настройки. Можно заметить, как деформировалась поверхность управления, чтобы поставленные условия лучше удовлетворялись. Как видно из табл.3, целевая функция уменьшена относительно ее оптимизированного значения в случае классического контроллера. Заметно также из рис.10, что все ограничения на поведение системы выполнены. Запас устойчивости также обеспечен, так как все значения k_p и k_i расположены в зоне, определенной границами $m \geq m_{req}$ и $\alpha \geq \alpha_{req}$. Изменения k_p и k_i в течение процесса управления показаны на рис.12. Черными точками показаны значения параметров после

Таблица 3. Результаты перед и после настройки фаззи-контроллера

	Перед настройкой		После настройки	
Параметры контроллера	$k_{p1,2,3,4,5}=1.109$	$k_{i1,2,3,4,5}=0.083$	$k_{p1}=0.708$	$k_{i1}=0.134$
			$k_{p2}=1.209$	$k_{i2}=0.060$
			$k_{p3}=1.893$	$k_{i3}=0.523$
			$k_{p4}=1.143$	$k_{i4}=0.299$
			$k_{p5}=2.832$	$k_{i5}=0.209$
Целевая функция	9.72 ($t = 0:20$ сек.)		9.03 ($t = 0:20$ сек.)	

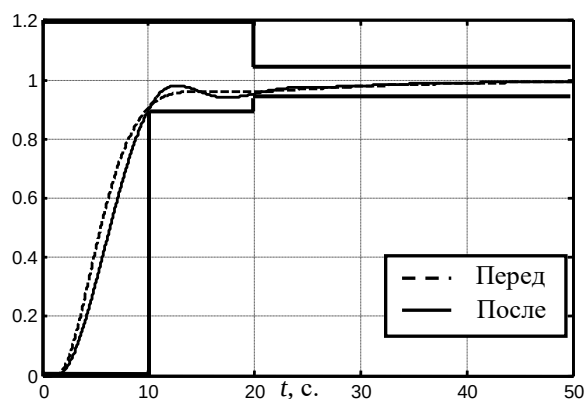


Рис. 10. Поведение системы до и после настройки фаззи-контроллера

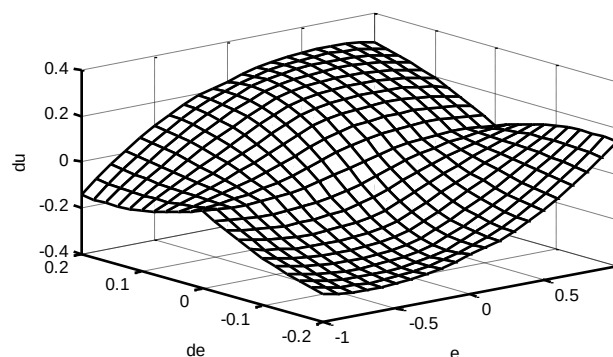


Рис. 11. Поверхность управления фаззи-контроллера после настройки

настройки. Видно, что изменения параметров полно-

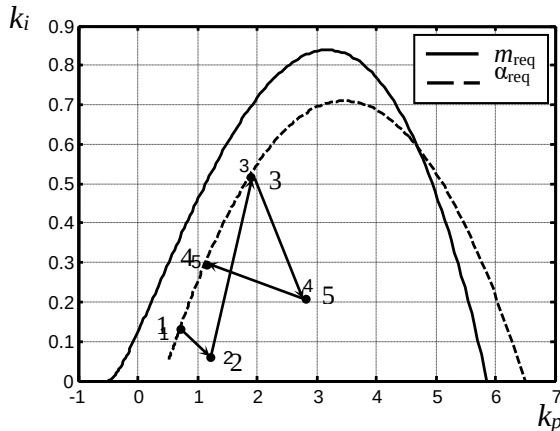


Рис. 12. Изменение фаззи-параметров k_p и k_i в течение процесса управления

стью укладываются в многоугольник 1-2-3-4-5. Так как значения параметров k_p и k_i в любой момент времени расположены в зоне, определенной границами $m \geq m_{req}$ и $\alpha \geq \alpha_{req}$ можно сказать, что предложенный контроллер обеспечивает необходимый запас устойчивости.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе описан метод настройки фаззи-контроллера типа Такаги–Сугено, который гарантирует определенный запас устойчивости и удовлетворяет ряд требований по поведению системы и минимизации целевой функции. Для настройки параметров использован алгоритм оптимизации "градиентный спуск". Произведено сравнение между классическим ПИ-контроллером и предложенным фаззи-контроллером на примере объекта 3-го порядка. Результаты показали, что предложенный фаззи-контроллер позволил уменьшить по сравнению с классическим целевую функцию, одновременно удовлетворяя всем требованиям по поведению и устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **L. A. Zadeh**, Fuzzy Sets, Information and control, 8, 1965, p. 338-353.
2. **Xuquan Li et al.** A New Method for Controlling Refrigerant Flow in Automobile Air Conditioning, Applied Thermal Engineering 24, 2004, p. 1073-1085.
3. **J. Tang, H. Shoaee**. A Comparative Study of Fuzzy Logic and Classical Control with EPICS, ICALEPCS 95, Chicago, IL USA, Nov. 1995, p. 223-228.
4. **Zhiqiang Gao et al.**, A stable Self-Tuning Fuzzy Logic Control System for Industrial Temperature Regulation, IEEE Industrial Application Society 2000, Annual meeting and world conference on industrial application of electrical energy, IEEE IAS Transactions, Oct. 8-12, 2000, p. 171-179.
5. **Michael Hanss**. Design and Optimization of a Nonlinear Fuzzy Controller Using Fuzzy Process Models, Fourth Eu-

ropean Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing – EUFIT, 96, Verlag Vieweg, Aachen, 1996, pp. 1875-1880.

6. **P. Pivonka, P. Blaha**. Comparative Analysis of Classical and Fuzzy PID Control Algorithms, Proceedings of 7th Zittau fuzzy colloquium, Germany, 1999, P. 176-181.
7. **C. Karakuzu, S. Ozturk**. A Comparison of Fuzzy, Neuro and Classical Control Techniques Based on an Experimental Application, Journal of Qafqaz University, Fall 2000, Number 6, pp. 189-198.
8. **Stanley E. Woodard**. A Numerical Optimization Approach for Tuning Fuzzy Logic Controllers, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B, Volume 29, 1999, p. 565-569.
9. **Neil Petroff et al.** Numerical Stability Analysis of a Fuzzy Controller, Proceedings of the Artificial Neural Networks in Engineering (ANNIE,98) Conference, St. Louis, Missouri, Nov. 1-4, 1998, p. 91-97.
10. **В.Я. Ротач**. Теория автоматического управления, изд. МЭИ, 2004, С. 399.

Разработка алгоритмов систем автоматического регулирования для барабанных котлов-утилизаторов нового типа малой производительности, предназначенных для утилизации отходов нефтехимических предприятий.

Морозов В.В. студ.

В настоящее время отсутствуют типовые алгоритмы систем автоматического регулирования барабанных котлов утилизаторов, предназначенных для утилизации отходов нефтехимических предприятий. Разработкой подобных алгоритмов занимается студент кафедры автоматизации технологических процессов МЭИ(ТУ) Морозов Виталий. Целью разработки является дальнейшее внедрение и использование такого рода алгоритмов при программировании контроллеров и других средств автоматизации на промышленных предприятиях, устанавливающих котлы-утилизаторы новых образцов с дожиганием нескольких видов топлива.

В целом разработка систем автоматизации котлов данного типа предназначена решить проблему их многорежимной работы при совместном использовании различных энергоносителей традиционных и утилизируемых видов. Например:

- Утилизация выхлопных дымовых газов дизельнопоршневого агрегата.
- Газ нефтепереработки.
- Атмосферный остаток процесса висбрекинга гудрона.
- Природный газ.
- Мазут.

При проектировании систем автоматизации для новых небольших теплоэлектростанций, устанавливаемых на нефтехимических предприятиях, необходимо рассмотреть и решить следующие вопросы:

- Решить и разработать по данному проекту функциональные схемы контроля и автоматизации котла.
- Разработать рабочие спецификации на датчики, приборы и различную аппаратуру для автоматизации котла.
- Решить и разработать регуляторы нагрузки и оптимальной подачи воздуха при работе на всех режимах котла, связанных с утилизацией выхлопных газов дизельнопоршневого агрегата и других сжигаемых видов топлива.
- Решить и разработать структурные, электрические схемы и алгоритмы системы автоматического регулирования котла.

Студент Морозов В. ранее принимал участие в исследовательской работе по данному направлению во время обучения и производственных практик. Сейчас работа студента, связанная с выполнением и расчетом алгоритмов управления, относится к новым разработкам на которые отсутствуют типовые решения.

ПОСТРОЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО АЛГОРИТМА ЛОГИЧЕСКОЙ ПОШАГОВОЙ ПРОГРАММЫ ПУСКА ПГУ-450

1. Введение. В соответствии со стратегией развития энергетики в РФ и с Концепцией технической политики РАО «ЕЭС России» до 2009 года приоритетным направлением в строительстве новых энергетических объектов стали бинарные парогазовые установки большой мощности – 800, 450, 325, 180 МВт [1]. При этом новые энергоблоки ПГУ должны оснащаться полномасштабными автоматизированными системами управления с высокоразвитой диагностикой и высокой степенью автоматизации, как внутренней (взаимосвязь с отдельными технологическими зонами и агрегатами), так и внешней (взаимосвязь с общестанционными системами верхнего уровня и с системами оперативного диспетчерского управления).

Стоимость программно-технических средств и их базового и прикладного программного обеспечения достаточно высока и для их окупаемости в первую очередь необходимо широкое применение в процессе эксплуатации тех функций АСУТП, которые дают наибольший экономический эффект, в числе которых автоматизированные пуски ПГУ из различных тепловых состояний.

В настоящее время процесс закупки оборудования для энергоблоков ТЭС происходит по принципу выбора отдельных элементов комплекса, а задача связать их воедино возлагается на проектные, научно-исследовательские институты и наладочные организации. В логике верхнего уровня АСУ ТП наиболее значимую часть занимают вопросы автоматизации переходных режимов и, в первую очередь, пусковых, причем оборудование различных поставщиков должно работать в едином, непрерывном процессе и этому следует уделять особое внимание на стадии проектирования.

Сама по себе задача отработки технологии пуска оборудования энергоблока для вновь вводимого в эксплуатацию комплекса является приоритетной, поскольку правильное ведение пускового режима предполагает эксплуатацию оборудования в соответствии с требованиями заводов-изготовителей с обеспечением при этом максимальной эффективности и экономичности его работы.

Автоматизация пусковых процессов не позволяет нарушать эти требования и правила.

2. Основные концептуальные решения по оптимизации технологии пусковых режимов. Разработке логических программ управления должна предшествовать оптимальная технология ведения режимов пуска оборудования, определен порядок ввода оборудования в работу с соблюдением всех требований и критериев надежности согласно условиям его эксплуатации. В этой связи, на энергоблоках ПГУ-450 принята следующая концепция технологии пуска основного и вспомогательного оборудования [4].

Пуски блока ПГУ-450 могут осуществляться по различным технологическим схемам, определяемым исходным тепловым состоянием пускаемого оборудования (холодное, неостывшее и горячее состояния) и составом пускаемого оборудования (полный или неполный состав блока).

Как показали результаты режимных испытаний и проведенных расчетных обоснований основных критериев надежности элементов тепловой схемы, пуски энергоблока ПГУ-450 Северо-Западной ТЭЦ и Калининградской ТЭЦ-2 из всех типовых тепловых состояний должны осуществляться на сниженных параметрах пара высокого давления по технологической схеме последовательного пуска:

$$ГТ1 + КУ1 \rightarrow ПТ \rightarrow ГТ2 + КУ2 \rightarrow ГТ1+ГТ2+ПТ$$

Такая технологическая последовательность пусковых режимов позволяет одновременно унифицировать ее для любых бинарных ПГУ.

Применение технологии последовательного пуска блока предполагает наличие следующих этапов:

I этап – последовательное заполнение конденсатно-питательного тракта и подготовка котла-утилизатора к работе;

II этап - пуск, синхронизация и нагружение ГТУ до нагрузки, необходимой для

прогрева паропроводов контура высокого давления в зависимости от теплового состояния паропроводов и металла паровпуска ЦВД паровой турбины;

III этап – разворот, синхронизация и нагружение паровой турбины;

IV этап – нагружение энергоблока до уровня заданной нагрузки диспетчерским графиком.

Для начала работы любой логической пошаговой программы управления оборудованием должны быть созданы технологические условия начала ее работы. Технологические условия начала работы программы должны соответствовать точному моменту её включения в работу и однозначно их определять. Если такие условия созданы, программа может включиться в работу автоматически и(или) по разрешению оператора.

3. Общая структура функционально-группового управления пуском оборудования энергоблока. Упрощенная структура логического управления пуском энергоблока ПГУ-450 приведена на рис. 1.

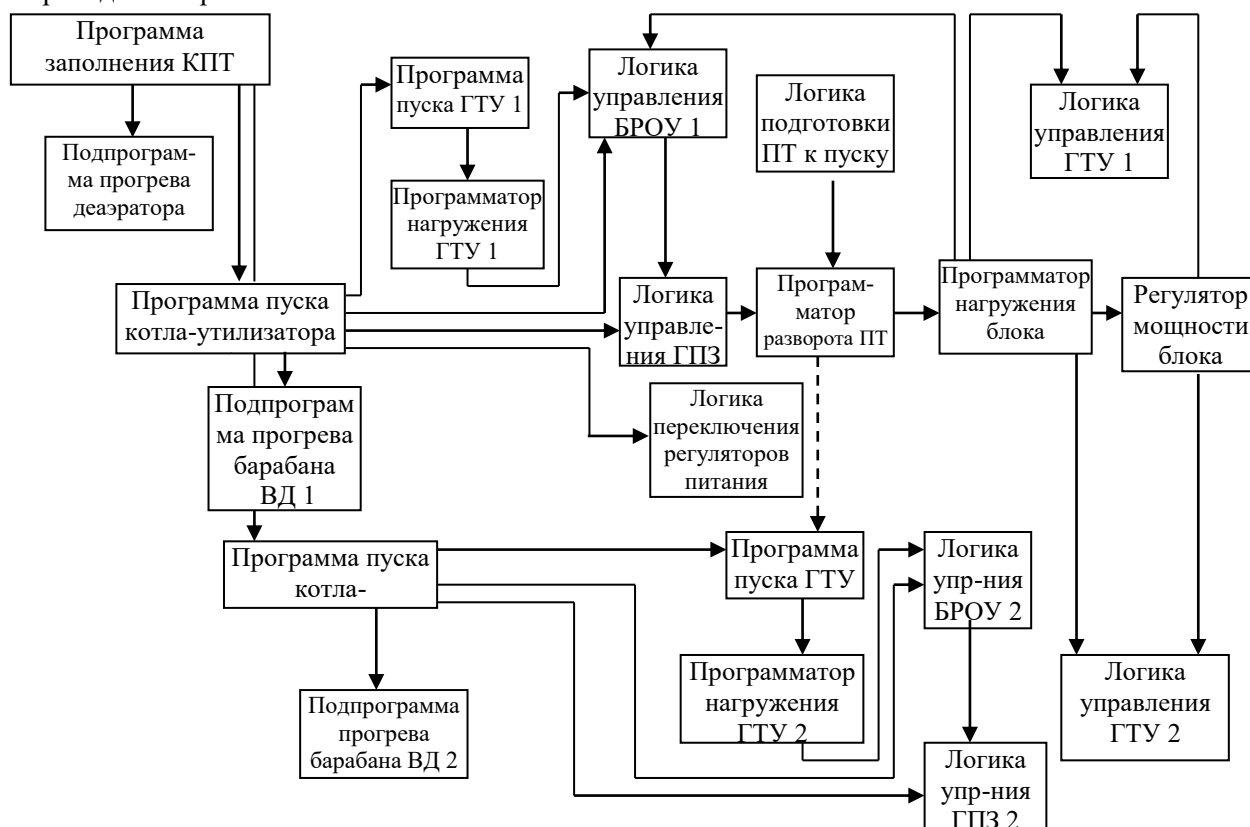


Рис. 1. Упрощенная структура логического управления пуском энергоблока ПГУ-450.

На упрощенной структурной схеме изображены основные логические программы верхнего уровня, объединенные общей технологической последовательностью. Основная часть логических программ представляет собой пошаговые логические программы.

Логика управления ГТУ и регулятор мощности блока представляют собой сложные системы автоматического регулирования с автоматически изменяемым заданием, развитой системой диагностики состояния оборудования и, как следствие – развитой системой технологических ограничений (внутренних блокировок).

На упрощенной структурной схеме блочный координатор, как отдельно выделенный элемент, отсутствует. Однако его функции четко определены взаимосвязями между отдельными логическими программами структурной схемы.

Горизонтальные связи указывают последовательность включения логических программ при наличии технологических и организационных условий на их автоматический ввод в работу. Вертикальные связи указывают взаимодействие логических программ между собой.

Следует отметить, что некоторые пошаговые логические программы могут

автоматически останавливаться для выполнения оперативным персоналом ручных операций. В основном ручные операции проводятся на подготовительных этапах заполнения технологических трактов средой (открытие и закрытие ремонтной арматуры, открытие и закрытие воздушников, анализ проб и т.п.). Ручные операции предусматриваются также и на работающем оборудовании, например, при развороте паровой турбины обязательным требованием в связи с жестким регламентом инструкции по эксплуатации является «прослушивание» агрегата на фиксированных значениях (500 об/мин и 1200 об/мин) скорости вращения ротора паровой турбины.

После выполнения ручных операций логическая пошаговая программа может продолжать реализацию алгоритма после разрешения на то оператора.

4. Оптимизация алгоритма логической пошаговой программы управления функциональной группой оборудования. Принципиально, задачу выбора оптимальной технологии пуска ПГУ можно сформулировать, как изменение состояния основного и вспомогательного оборудования энергоблока от заданного исходного состояния [в зависимости от совокупности исходных параметров y_{ij}^0 ($i = 1, 2, \dots, n$ – число управляемых параметров j -го элемента ПГУ, $j = 1, 2, \dots, G$)] в требуемое, определяемое конечными (заданными) значениями этих же параметров y_{ij}^H с целью обеспечения минимального расхода основных ресурсов (минимальные затраты топлива, воды, тепла, электроэнергии на собственные нужды и т.д.) на весь период пуска.

Суммарные затраты за период пуска представим в виде:

$$S_{\Pi}(\tau_{\Pi}) = S_{\text{В}}(\tau_{\Pi}) + S_{\text{Э}}(\tau_{\Pi}) + S_{\text{Д}}(\tau_{\Pi}) + S_{\text{Г}}(\tau_{\Pi}) \quad (1)$$

где:

$S_{\text{В}}(\tau_{\Pi})$ – стоимость затраченного топлива за период пуска (или стоимость потерь топлива);

$S_{\text{Э}}(\tau_{\Pi})$ – стоимость электроэнергии на собственные нужды;

$S_{\text{Д}}(\tau_{\Pi})$ – стоимость стороннего пара, использованного в период пуска ПГУ;

$S_{\text{Г}}(\tau_{\Pi})$ – стоимость средств на подготовку химочищенной воды и на сбрасываемый в БЗК конденсат.

Если представить процесс пуска ПГУ как последовательность пусковых этапов k составных элементов ПГУ (подготовительные операции, пуск ГТ и т.д.) (см. п.2), то функцию затрат (1) можно сформулировать в следующем виде:

$$S_{\Pi}(\tau_{\Pi}) = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \left[C_{\text{Т}} \int_{\tau_{\text{л}}}^{\tau_{\text{л}2}} B_{kl}^{\text{ГТ}} \cdot d\tau - C_{\text{Э}} \int_{\tau_{\text{л}}}^{\tau_{\text{л}2}} (\text{Э}^{\text{ГТ}} + \text{Э}^{\text{ПТ}})_{kl} \cdot d\tau \right] + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L C_{\text{Э}}^{\text{СН}} \int_{\tau_{\text{л}}}^{\tau_{\text{л}2}} N_{kl}^{\text{СН}} \cdot d\tau + \\ + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L C_{\text{Д}}^{\text{СН}} \int_{\tau_{\text{л}}}^{\tau_{\text{л}2}} D_{kl}^{\text{СН}} \cdot d\tau + \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \left(C_{\text{ХВ}} \int_{\tau_{\text{л}}}^{\tau_{\text{л}2}} G_{\text{ХВ}} \cdot d\tau + C_{\text{К}} \int_{\tau_{\text{л}}}^{\tau_{\text{л}2}} G_{\text{К}} \cdot d\tau \right) \quad (2)$$

где:

$k = 1, 2, \dots, K$ – число этапов пуска ПГУ;

$l = 1, 2, \dots, L$ – число операций на k -ом этапе пуска;

$C_{\text{Т}}$, $C_{\text{Э}}$, $C_{\text{Э}}^{\text{СН}}$, $C_{\text{Д}}$, $C_{\text{ХВ}}$, $C_{\text{К}}$ – удельные стоимости соответственно топлива, выработанной ПГУ электроэнергии (тариф отпущенной энергии), электроэнергии на собственные нужды, стороннего пара, химочищенной воды и сбрасываемого загрязненного конденсата;

$B_{kl}^{\text{ГТ}}$ – функция расхода топлива (газа) на газовой турбине при проведении l -ой операции пуска k -го этапа;

$\text{Э}_{\text{ГТ}}$, $\text{Э}_{\text{ПТ}}$ – функции отпуска (выработки) электроэнергии газовой и паровой турбиной, соответственно;

$N_{\text{СН}}$ – функция затрат электроэнергии на собственные нужды;

$D^{\text{СН}}$ – функция затрат стороннего пара;

$G_{\text{хв}}, G_{\text{к}}$ – функции, определяющие величины подготовленной химочищенной воды и потерь конденсата.

Анализ подынтегральных функциональных зависимостей в выражении (2) показывает, что эти зависимости носят линейный или кусочно-линейный характер и постоянны во времени для отдельных этапов или операций пуска. В этих условиях минимум затрат $S_{\text{п}}(\tau_{\text{п}})$ будет соответствовать минимуму суммарной длительности пусковых операций.

Каждый этап пуска по представленной схеме (рис. 1.) представляет собой совокупность пусковых операций, цель которых – перевести заданную технологическую зону (технологический агрегат или технологический узел) из определенного известного исходного состояния в требуемое конечное состояние, при этом конечное состояние предыдущего этапа является заданным исходным состоянием для последующего этапа пуска.

При такой постановке задачи функцию затрат (2) можно представить в виде:

$$\tau_{\text{п}} = \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \tau_{kl} (y_{kij}^0, y_{kij}^{\text{н}}) \rightarrow \min, \quad (3)$$

где:

$l = 1, 2, \dots, L$ – совокупность операций в k -ом этапе пуска;

$y_{kij}^0, y_{kij}^{\text{н}}$ – начальное и конечное значение i -го управляемого параметра j -го элемента блока на k -ом этапе пуска.

Принимаем, что обязательным условием перехода на выполнение $(k + 1)$ этапа пуска является выполнение на выходе из k -го этапа условия

$$y_{kij}^{\text{н}} = y_{(k+1)ij}^0, \quad (4)$$

что означает функциональную зависимость τ_{kl} от параметров y_{kij}^0 и $y_{kij}^{\text{н}}$ и независимость функций τ_k между собой.

В этих условиях из известных математических методов оптимального управления наиболее приемлемым для выбора оптимального алгоритма управления пуском является принцип Беллмана (метод динамического программирования), в соответствии с которым пошаговая оптимизация проводится в следующей последовательности:

– первый шаг:

$$k = 1 \quad \tau_{\text{п}1} = \sum_{l=1}^{L_1} \tau_{1l} (y_{1ij}^0, y_{1ij}^{\text{н}}) \rightarrow \min, \quad (5)$$

– второй шаг:

$$k = 2 \quad \tau_{\text{п}1,2} = \left\{ \left[\sum_{l=1}^{L_1} \tau_{1l} (y_{1ij}^0, y_{1ij}^{\text{н}}) \right]_{\min} + \sum_{l=1}^{L_2} \tau_{2l} (y_{2ij}^0, y_{2ij}^{\text{н}}) \right\} \rightarrow \min, \quad (6)$$

– и т.д.

$$\text{при } k = K \quad \tau_{\text{п}1,K} = \left\{ (\tau_{\text{п}1,K-1})_{\min} + \sum_{l=1}^{L_K} \tau_{Kl} (y_{Kij}^0, y_{Kij}^{\text{н}}) \right\} \rightarrow \min \quad (7)$$

На каждом k -ом этапе оптимизации учитываются следующие ограничения, накладываемые на y_{ij} :

– по условию “безопасности”

$$y_{ij}^{\min} \leq \overline{y_{kij}}(\tau_{\text{п}k}) \leq y_{ij}^{\max} \quad (8)$$

– по условию градиента скорости изменения управляемого параметра

$$\left(\frac{|\Delta y|}{\Delta \tau} \right)_{kij} \leq \beta_{ij} \cdot \left| \Delta \overline{y_{kij}^{\text{н}}} \right|_k \quad (9)$$

- по условию реализуемости и безопасности управления

$$u_{ij}^{\min} \leq \bar{u}_k \leq u_{ij}^{\max} \quad (10)$$

В (8-10) приняты следующие обозначения:

- $\bar{y}_{ijk}(\tau_{pk})$ – текущее значение управляемого параметра y_{ij} на k -ом подэтапе пуска (при автоматизированном пуске на базе АСУ ТП с ПТК ограничения типа (10) заложены в алгоритмы пусковых операций);

$y_{ij}^{\min}$ и $y_{ij}^{\max}$ – минимальное и максимальное допустимое значение параметра y_{ij} по техническим условиям эксплуатации;

$\left(\frac{|\Delta y|}{\Delta \tau}\right)_{kij}$ – градиент скорости изменения управляемого параметра y_{ij} на k -ом этапе пуска;

$\left|\Delta y_{ij}^{\Delta}\right|_k$ – допустимая по техническим условиям скорость изменения параметра y_{ij} на k -ом этапе пуска;

$\beta_{ij} \leq 1$ – алгоритмически определяемый (по экспертным оценкам или оцениваемый по результатам наладочных испытаний) коэффициент ограничения градиента скорости изменения управляемого параметра.

При $\beta = 1$ минимальное время реализации k -го этапа пуска соответствует условию:

$$\left(\frac{|\Delta y|}{\Delta \tau}\right)_{kij} = \overline{\Delta y_{kij}^{\Delta}}, \text{ т.е. } \Delta \tau_{\min k} = \frac{|\Delta y|_{kij}}{\overline{\Delta y_{kij}^{\Delta}}} \quad (11)$$

Это означает, что скорость изменения параметра y_{ij} соответствует максимально допустимой на данном этапе пуска, что в условиях наличия внешних и внутренних неуправляемых возмущений является практически невыполнимым условием.

Таким образом, оптимальная длительность каждого k -го этапа пуска будет зависеть от правильного выбора параметра y_{ij} , имеющего наименьшую допустимую скорость изменения его градиента и правильной оценки значения коэффициента β_{ij} , т.е.

$$\tau_k^* = \left[\left(\frac{|\Delta y_{ij}|}{\overline{\Delta y_{ij}^{\Delta}}} \right)_{\max} \cdot \frac{1}{\beta_{ij}^*} \right], \quad (12)$$

где:

$\left(\frac{|\Delta y_{ij}|}{\overline{\Delta y_{ij}^{\Delta}}}\right)_{\max}$ – максимальное значение искомого параметра $\frac{|\Delta y_{ij}|}{\overline{\Delta y_{ij}^{\Delta}}}$ на всей

совокупности управляемых параметров y_{ij} ;

β_{ij}^* – расчетное значение коэффициента β для выбранного параметра управления.

Критерий (12) временной – получен для непрерывных динамических процессов. Анализ пусковых процессов показывает, что на каждом этапе пуска присутствует значительное число логических и дискретных операций (в том числе ручных), накладывающих на процесс пуска определенные условия и ограничения. Очевидно, что они, как правило, увеличивают длительность пусковых операций,

При разработке программ автоматизированного пуска по алгоритму (5-7) на каждом k -ом шаге пуска (при $k > 1$) совместное решение подзадачи

$$\tau_{nk,k+1} = [\tau_{nk,\min} + \tau_{n(k+1)}]_{\min} \quad (13)$$

требует при необходимости пересмотра результатов, полученных на k -ом этапе оптимизации с целью обеспечения необходимых условий выполнения всех пусковых операций на $(k + 1)$ этапе. Так, например, для толчка и разворота паровой турбины параметры пара перед турбиной должны иметь строго определенные величины (т.н. “предпусковые” параметры пара) в зависимости от теплового состояния паровпуска ЦВД. Если же окончание предыдущего этапа

(пуск КУ1) пуска контролируется, например, по скорости изменения разности температур верха и низа металла барабана высокого давления КУ1, то после обеспечения условий прогрева металла барабана условие по величине температуры и давлению пара, необходимые для последующего пуска паровой турбины, могут быть не обеспечены.

При наличии аналогичных ситуаций выполнения условия (13) требует пересмотра результатов оптимизации k -го этапа пуска. В таком случае, помимо вышеприведенных условий (8-10) добавляется дополнительное условие

$$y_{k,m}^H \geq y_{(k+1),m}^0, \quad (14)$$

где:

$y_{(k+1),m}^0$ – требуемое значение $m \in i$ -го параметра в начале $(k+1)$ -го этапа;

$y_{k,m}^H$ – значение этого же параметра в конце k -го этапа пуска (знак $>$ или $=$ определяется техническими условиями пуска оборудования ПГУ).

Таким образом, совместное выполнение условий (8-10) и (14) по всем этапам пуска и выбор оптимальных значений β_{ij} обеспечивают достижение оптимальной суммарной длительности пуска ПГУ в целом.

Выбор параметра β_{ij} проводится при проведении наладочных испытаний с целью отработки и оптимизации алгоритма автоматизированного пуска и уточняется в ходе эксплуатации.

5. Заключение. Фирмой ОРГРЭС г.Москва совместно с рядом других организаций проведены практические исследования работоспособности алгоритмов пошаговых программ верхнего уровня. Впервые в России получены положительные результаты внедрения в производство программ логического управления основным и вспомогательным оборудованием энергоблока ПГУ-450, включая взаимосвязи основных логических программ. Внедрение логических пошаговых программ управления функциональными группами оборудования позволило обеспечить непрерывность технологического процесса пуска, нагружения и вывода на номинальные (или заданные) технологические параметры, исключая, возможные ошибки персонала. И, как следствие – повышение экономичности парогазовой установки в целом.

Полученные результаты выполненной работы, безусловно, имеют огромную важность, т.к. в целом подтверждают правильность идей, представленных в данной работе. Коллективу специалистов, участвующему в подготовке и проведении испытаний, удалось реализовать множество технических предложений и, тем самым, решить поставленные задачи по автоматизации пуска ПГУ. Вместе с тем коллектив разработчиков считает, что работы по оптимизации логических программ следует продолжать.

Список литературы

1. «Концепция технической политики ОАО РАО «ЕЭС России», Москва, 2005 г.
2. Р.И. Костюк, И.Н. Писковацков, А.В. Чугин, Н.Н. Коцюк, Ю.А. Радин, П.А. Березинец. Некоторые особенности режимов эксплуатации головного энергоблока ПГУ-450Т // Журнал «Теплоэнергетика» №9, 1999 г.
3. В.С. Невзгодин, И.В. Аристархова. Опыт организации пусконаладочных работ при внедрении АСУ ТП энергоблока ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ // Журнал «Тепловые электрические станции» №5, 2003.
4. В.С. Невзгодин, И.В. Аристархова, С.А. Мартюк, В.А. Биленко. Опыт внедрения технологических функций АСУ ТП на энергоблоке ПГУ-450Т Северо-Западной ТЭЦ // Журнал «Тепловые электрические станции» №5, 2003.
5. Невзгодин В.С., Радин Ю.А., Панько М.А. Алгоритмические основы автоматизации пуска парогазовых установок большой мощности // Журнал «Теплоэнергетика» №10, 2007.

Разработка структуры модели энергоблока ПГУ-450 и локальных моделей ГТЭ-160 и котла-утилизатора П-116

А.С. Обуваев, асп.; рук. Э.К. Аракелян, д.т.н., проф.

Московский энергетический институт

Модель энергоблока ПГУ-450, по функциональности, была разбита на две части: модели объекта управления и модели управляющего объекта (модели АСУТП). Каждая из моделей состоит из локальных моделей, которые, в свою очередь, состоят из ряда взаимосвязанных участков. Разработка, отладка и привязка которых проводилась в комплексе ПО SIM-2000, разработанного ЗАО «Тренажеры для электростанций» для создания своих тренажеров.

Модель объекта управления является основной программной составляющей модели энергоблока в целом. Она состоит из четырех локальных моделей:

1. Модели ГТ-1 и КУ-1;
2. Модели ГТ-2 и КУ-2;
3. Модели ПТ с подогревателями, деаэратором и конденсатором (общестанционное оборудование);
4. Модели механизмов собственных нужд.

Критерием объединения оборудования в локальные модели является удобство реализации и отладки участков энергоблока.

В работе определена структура модели энергоблока ПГУ-450, описаны теоретические основы моделирования участков газовой турбины и котла-утилизатора. В основе моделей технологического оборудования лежат дифференциальные уравнения баланса энергии, массы и количества движения с учетом их распределенности по пространственной координате. Коэффициенты уравнений определены по конструктивным данным компонентов.

Для проведения исследований в модели АСУТП был реализован ряд автоматических устройств, без которых эксплуатация реального блока (а значит, и использование модели) невозможна, или, по крайней мере, весьма затруднена [1].

Целью работы является разработка структуры модели энергоблока ПГУ-450 и локальных моделей ГТЭ-160 и П-116, их отладка, сравнение с экспериментальными и расчетными данными, а также исследование режимов работы, как в регулировочном диапазоне, так и при пусках и остановах.

Проведенные исследования показали, что переходные характеристики разработанных моделей ГТЭ-160 и П-116 с вероятностью 95% совпадают с экспериментальными и расчетными данными заводов изготовителей во всем диапазоне нагрузок полублока, и что разработанные модели могут быть включены в состав всережимной динамической модели блока ПГУ-450.

Литература

1. Радин Ю. А., Рубашкин А.С., к.т.н. Давыдов А., Рубашкин В. А., инженеры ВТИ - ЗАО «Тренажеры для электростанций». Оработка пусковых режимов энергоблока ПГУ-450 Калининградской ТЭЦ-2 на математической модели - М.: Теплоэнергетика №10, 2005.

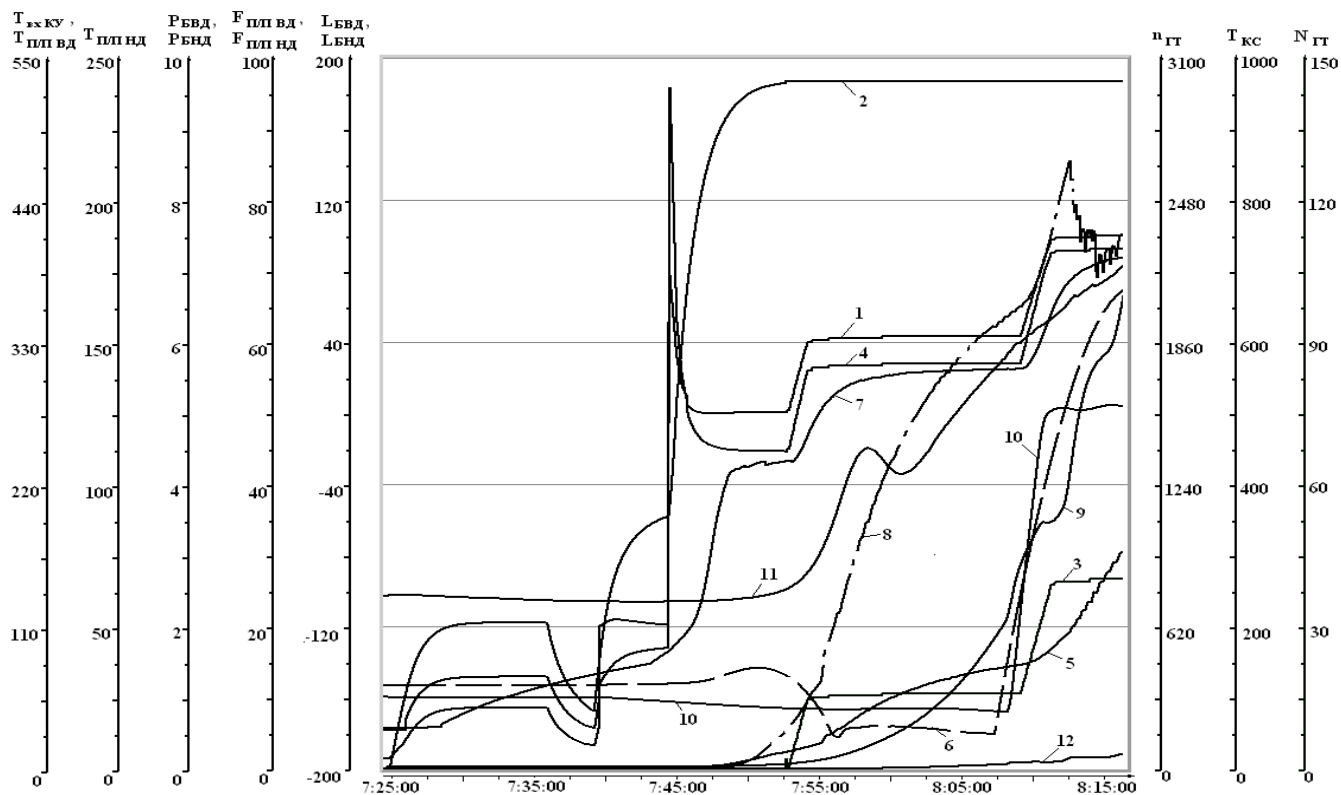


рис.1. Пуск полублока энергоблока ПГУ-450 (набор нагрузки на ГТЭ-160 до 40 МВт).

Обозначения:

- 1) $T_{КС}$ - температура газов в камере сгорания, °C;
- 2) $n_{ГТ}$ - обороты газовой турбины, об/мин;
- 3) $N_{ГТ}$ - мощность газовой турбины, МВт;
- 4) $T_{вх КУ}$ - температура газов на входе в котел-утилизатор, °C;
- 5) $P_{ВД}$ - давление в барабане высокого давления, МПа;
- 6) $L_{ВД}$ - уровень воды в барабане высокого давления, мм;
- 7) $T_{плп вД}$ - температура пара на выходе пароперегревателя ВД, °C;
- 8) $F_{плп вД}$ - расход пара через пароперегреватель ВД, т/ч;
- 9) $P_{НД}$ - давление в барабане низкого давления, МПа*10;
- 10) $L_{НД}$ - уровень воды в барабане низкого давления, мм;
- 11) $T_{плп нД}$ - температура пара на выходе пароперегревателя НД, °C;
- 12) $F_{плп нД}$ - расход пара через пароперегреватель НД, т/ч.

ИЗМЕРЕНИЕ СТЕПЕНИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В ПАРОВЫХ КОТЛАХ

АННОТАЦИЯ

В статье приводится анализ методической погрешности косвенного измерения степени рециркуляции дымовых газов в паровых котлах путем прямого измерения перепадов давления дымовых газов на поверхностях нагрева до и после отбора на рециркуляцию. Материалы доклада являются продолжением работы с аналогичным названием [1].

1. ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с [2] степень рециркуляции дымовых газов в паровом котле r определяется как

$$r = Q_{\text{рц}} / Q_2, \quad (1)$$

где $Q_{\text{рц}}$ — расход дымовых газов, отбираемых на рециркуляцию, Q_2 — расход дымовых газов за местом отбора.

На рис. 1 представлена схема рециркуляции дымовых газов на котле ТП-87 номинальной паропроизводительностью 420 т/ч, реконструированном для сжигания газа и мазута. Котлы такого типа широко используются на городских ТЭЦ, в том числе г. Москвы.

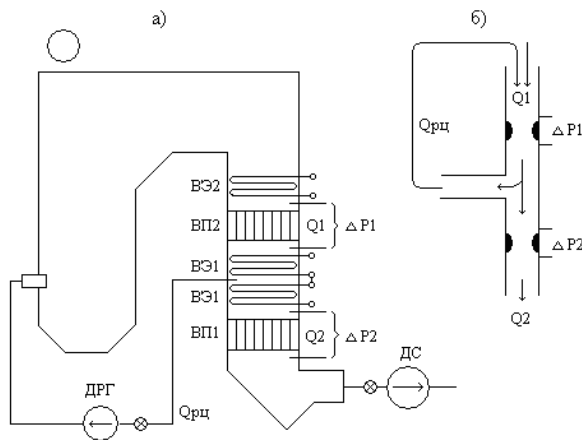


Рис. 1. Схема рециркуляции дымовых газов на котле ТП-87

Дымовые газы отбираются на рециркуляцию из расщетки водяного экономайзера первой ступени (ВЭ1) и дымососами рециркуляции газов (ДРГ) подаются в смесители на линии горячего воздуха или в специальные каналы горелок.

При турбулентном течении дымовых газов в поверхностях нагрева конвективной шахты котла расход дымовых газов Q и гидравлическое сопротивление ΔP пакета по газовой стороне **связаны** квадратичной зависимостью. Перепады давления, например, на пакетах воздухоподогревателя второй и первой ступеней **связаны** с соответствующими расходами следующими формулами (см. рис. 1):

$$Q_1 = K_1 \sqrt{\Delta P_1}; \quad Q_2 = K_2 \sqrt{\Delta P_2}. \quad (2)$$

Коэффициенты K_1 и K_2 зависят от геометрии пакетов и физических свойств (плотности, вязкости) среды, которые, в свою очередь, зависят от температуры.

Степень рециркуляции дымовых газов определяется по формуле (вывод приведен в [1]):

$$r = K \frac{\sqrt{\Delta P_1}}{\sqrt{\Delta P_2}} - 1, \quad (3)$$

где коэффициент K равен отношению K_1/K_2 и содержит информацию о геометрии и свойствах дымовых газов в поверхностях нагрева ВП2 и ВП1.

Расчетное определение коэффициента K связано с громоздкими расчетами, требует большого количества исходных данных и соответствующей квалификации персонала. Гораздо проще определить значение K экспериментально, при этом будет учтена вся конкретика данного котла. Если установить на котле режим, для которого будет заведомо известно значение r , то, измерив значения ΔP_1 и ΔP_2 , из уравнения (3) можно определить K . Таким единственным режимом является режим отключенной рециркуляции, т.е. $r = 0$. При этом

$$K = \frac{\sqrt{\Delta P_2^0}}{\sqrt{\Delta P_1^0}}, \quad (4)$$

где ΔP_1^0 , ΔP_2^0 — перепады давления на ВП2 и ВП1 при отключенной рециркуляции дымовых газов.

Полученное таким образом значение коэффициента K будет оставаться постоянным пока не изменится геометрия поверхностей нагрева, температура или состав дымовых газов. Из трех перечисленных факторов наиболее стабильным является геометрический фактор (особенно при сжигании газа, когда на поверхностях нагрева не осаждаются зола и сажа); другие два фактора зависят от нагрузки котла D , избытка воздуха α и степени рециркуляции газов r . Для практического использования формулы (3) важно знать, в какой степени режимные параметры D , α и r влияют на коэффициент K .

2. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА КОЭФФИЦИЕНТ K

Значения коэффициента K при различных значениях D , α и r определялись расчетным путем в соответствии с Нормативным методом [3] для котла ТП-87 при измерении перепадов давления дымовых газов ΔP_1 и ΔP_2 соответственно на пакетах трубчатого воздухоподогревателя второй (ВП2) и первой (ВП1) ступеней. При рассчитанных значениях ΔP_1 и ΔP_2 коэффициент K определялся по формуле

$$K = (r+1) \frac{\sqrt{\Delta P_2}}{\sqrt{\Delta P_1}}, \quad (5)$$

полученной из выражения (3).

Ниже приведен фрагмент аэродинамического расчета гидравлических сопротивлений ΔP_1 и ΔP_2 , представленный в виде алгоритма, на входе которого задаются значения D , α и r , а на выходе получают ΔP_1 , ΔP_2 и K .

1. $\alpha_1^{cp} = \alpha + \frac{2,36}{D}$; $\alpha_2^{cp} = \alpha + \frac{3,38}{D}$;
2. $B_1 = 0,081D$; $B_2 = 0,081D$;
3. $t_1^{cp} = 0,1D + 218,25r + 340$;
 $t_2^{cp} = 0,07D + 49,7r + 140$;
4. $G_1 = (9,93 + 8,844(\alpha_1^{cp} - 1)) \times$
 $\times (t_1^{cp} + 273)(1+r) \frac{B}{983}$;
 $G_2 = (9,93 + 8,844(\alpha_2^{cp} - 1)) \times$
 $\times (t_2^{cp} + 273) \frac{B}{983}$;
5. $w_1 = \frac{G_1}{20,02}$; $w_2 = \frac{G_2}{16,34}$;
6. $v_1 = 6,75 \cdot 10^{-11} (t_1^{cp})^2 + 9,845 \cdot 10^{-8} t_1^{cp} + 1,02 \cdot 10^{-5}$;
 $v_2 = 8,75 \cdot 10^{-11} (t_2^{cp})^2 + 8,635 \cdot 10^{-8} t_2^{cp} + 1,203 \cdot 10^{-5}$;
7. $Re_1 = \frac{0,048 w_1}{v_1}$; $Re_2 = \frac{0,037 w_2}{v_2}$;
8. $\lambda_1 = 0,11 \left(0,0042 + \frac{68}{Re_1} \right)^{0,25}$;
 $\lambda_2 = 0,11 \left(0,0054 + \frac{68}{Re_2} \right)^{0,25}$;
9. $\rho_1 = 5,109 (t_1^{cp})^{-0,189} - 1,121$;
 $\rho_2 = -0,6062 (t_2^{cp})^{0,1887} + 2,3956$;
10. $\Delta P_1 = (52,08 \lambda_1 + 0,395) (w_1)^2 \rho_1$;
 $\Delta P_2 = (135,1 \lambda_2 + 0,90) (w_2)^2 \rho_2$;
11. $K = (r+1) \frac{\sqrt{\Delta P_2}}{\sqrt{\Delta P_1}}$.

В приведенном выше алгоритме приняты следующие обозначения:

цифра «1» при переменной относится к расчету ΔP_1 , цифра «2» — к расчету ΔP_2 ; α — коэффициент избытка воздуха в горелках; α^{cp} — средний коэффициент избытка воздуха по пакету поверхности нагрева; D — паровая нагрузка котла, т/ч; B — расход газообразного топлива, тыс.м³/ч; t^{cp} — средняя температура дымовых газов по пакету, °C; G — расход дымовых газов, м³/с; w — скорость дымовых газов, м/с; v — кинематическая вязкость дымовых газов, м²/с; Re — число Рейнольдса для дымовых газов; λ — коэффициент сопротивления трения; ρ — плотность дымовых газов, кг/м³.

Расчет коэффициента K выполнялся для значений режимных параметров в диапазонах
 $210 \leq D \leq 420$; $0,96 \leq \alpha \leq 1,10$; $0 \leq r \leq 0,3$ (6)

программой Mathcad. Результаты расчетов представлены на рис.2—5.

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента K от D при фиксированных значениях $r = 0,15$ и $\alpha = 1,03$, на рис. 3 — зависимость K от r при фиксированных $D = 367,5$ и $\alpha = 1,03$, на рис. 4 — зависимость K от α при $D = 367,5$ и $r = 0,15$.

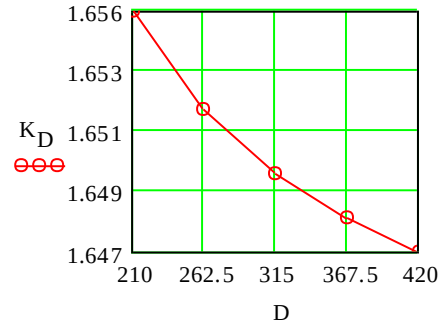


Рис. 2

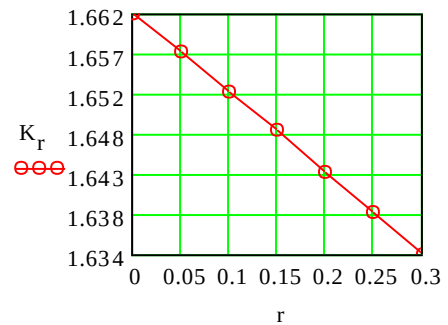


Рис. 3

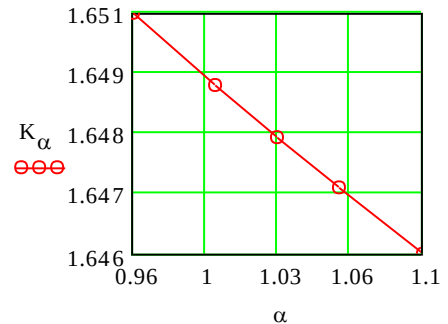


Рис. 4

Расчеты показывают, что наибольшее влияние на коэффициент K оказывает степень рециркуляции, при этом

$$\Delta K_r = 1,6620 - 1,6335 = 0,0285,$$

и неучет этого влияния при экспериментальном определении K по формуле (4) приведет к максимальной относительной погрешности

$$\delta_r = \Delta K_r / K_{r=0} = (0,0285 / 1,6620) 100 \% = 1,71 \%,$$

причем погрешность тем больше, чем больше r .

На практике рециркуляция дымовых газов на газомазутных котлах средней мощности (без промежуточного перегрева пара) используется как природоохранное мероприятие для снижения выбросов оксидов азота, при этом максимальная степень ре-

циркуляции при номинальной нагрузке редко достигает 0,2. В этом случае максимальная относительная погрешность, вызванная влиянием r , составит

$$\delta_r = (0,0189/1,662) \cdot 100\% = 1,14\%.$$

Аналогично, максимальная относительная погрешность, вызванная влиянием изменения паровой нагрузки D , равна

$$\delta_D = (0,0087/1,6555) 100\% = 0,53\%,$$

а погрешность, вызванная неучетом изменения α , —

$$\delta_\alpha = (0,052/1,6507) 100\% = 0,32\%.$$

На рис. 5 представлены границы возможных значений коэффициента K при изменении режимных параметров котла в пределах (6). Верхняя кривая соответствует значениям $D = 210$, $\alpha = 0,96$, а нижняя — $D = 420$, $\alpha = 1,10$.

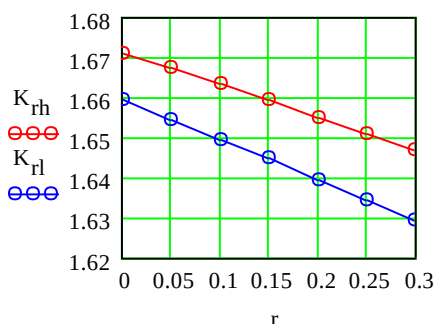


Рис. 5

При необходимости снижения методической погрешности измерения r в первую очередь необходимо исключить влияние степени рециркуляции на коэффициент K . Это нетрудно сделать, располагая зависимостью $K(r)$ при наиболее вероятных значениях D и α . Учитывая, что эта зависимость практически линейна (см. рис. 2), она может быть аппроксимирована выражением

$$K(r) = a + b \cdot r. \quad (7)$$

Подставив в формулу (3) вместо K его аппроксимирующее выражение (7) и разрешив полученное уравнение относительно r , получим новую, модернизированную формулу для измерения степени рециркуляции:

$$r = \frac{a\sqrt{\Delta P_1} - \sqrt{\Delta P_2}}{\sqrt{\Delta P_2} - b\sqrt{\Delta P_1}}. \quad (8)$$

Если влияние степени рециркуляции на K выглядит так, как это представлено на рис. 3, то

$$a = 1,662, \quad b = -0,093.$$

Формула (8) свободна от главной составляющей методической погрешности, связанной с изменением степени рециркуляции r , но для ее применения нужно знать параметры a и b , для определения которых необходимо выполнить аэродинамический расчет поверхностей нагрева, на которых измеряются перепады давления ΔP_1 и ΔP_2 . В большинстве случаев такая повышенная точность измерения не требуется, и это объясняется тем, для чего нужно измерять r . Измерение степени рециркуляции ды-

мовых газов необходимо для оптимизации атмосферноохранной деятельности на ТЭС, в частности, для регулирования выбросов оксидов азота отдельным котлом. Предельно допустимый выброс (ПДВ) нормируется для ТЭС в целом, каждый котел имеет свою цену подавления оксидов азота, определяемую его эколого-экономической характеристикой, и оптимальное значение выброса отдельного котла определяется в реальном масштабе времени программой оптимального распределения экологической нагрузки между котлами ТЭС в рамках ПДВ. Найденное этой программой оптимальное значение выброса i -го котла реализуется путем передачи уставки r_i регулятору степени рециркуляции газов данного котла. В свою очередь для построения эколого-экономических характеристик котлов используются концентрации оксидов азота, измеренные в лучшем случае с погрешностью 2%. Обычно применяемые газоанализаторы имеют погрешность 5%. Следовательно, погрешность уставки регулятору будет не менее 2—5%, и измерять r с погрешностью, существенно меньшей этих значений, не имеет смысла.

2. ВЫВОДЫ

Измерение степени рециркуляции дымовых газов в паровых котлах по формуле (3), т.е. путем измерения перепадов давления дымовых газов на поверхностях нагрева до и после отбора на рециркуляцию по сравнению с другими известными методами [1] имеет следующие преимущества:

- 1) простота реализации, требующая измерения только двух перепадов давления (ΔP_1 и ΔP_2);
- 2) универсальность, т.е. применимость как при подаче газов рециркуляции в горелку, так и при использовании смесителя, установленного на линии горячего воздуха перед горелками;
- 3) высокая точность измерения: инструментальная составляющая погрешности при использовании серийных дифманометров класса точности 0,5 или 0,25 мала, а методическая составляющая при использовании формулы (3) не превышает 2% и может быть снижена более чем вдвое при использовании формулы (8).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Парчевский В.М. Измерение степени рециркуляции дымовых газов в паровых котлах. // Теория и практика построения и функционирования АСУ ТП: Труды Международн. науч. Конф. М.: Изд-во МЭИ, 2005. С. 78—82.
2. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод). М.: Энергия, 1973.
3. Аэродинамический расчет котельных установок (Нормативный метод). Л.: Энергия, 1977.

Рисунки должны быть черно-белыми.

СПОСОБНОСТЬ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОТРАЖАТЬ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОТЛОВ

АННОТАЦИЯ

Использование моделей с распределенными параметрами гидродинамических процессов поверхностей нагрева котлов позволило выявить специфические особенности, в частности возможность появления резонансных свойств при слабой сжимаемости потока. Показано, что по сравнению с принятыми в работе моделями ранее применявшиеся в инженерной практике модели с сосредоточенными параметрами способны отражать гидродинамические характеристики лишь качественно и могут быть пригодными только для описания статических режимов. Выполнено исследование влияния коллекторов, конструктивных и технологических параметров теплообменника на резонансные свойства потока.

1. МОДЕЛИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ И СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

При построении аналитических моделей теплообменников в инженерной практике используются обыкновенные дифференциальные уравнения гидродинамики (точечные модели) или просто алгебраические уравнения (статические модели). Возможность такого упрощения может быть обоснована в результате сравнения динамических характеристик упрощенной модели с характеристиками более совершенных моделей [1] в виде дифференциальных уравнений в частных производных (моделей с распределенными параметрами). Целью данной работы является анализ способности различных аналитических моделей отражать особенности гидродинамических характеристик котлов.

Учтем, что скорость распространения тепловых процессов равна скорости движения потока в трубе, в то время как скорость распространения гидродинамических процессов равна скорости звука в потоке, т.е. гидродинамические процессы протекают на один — два порядка быстрее, чем тепловые. Это обстоятельство позволяет считать, что за время переходного процесса изменения расхода и давления температура потока не успевает измениться, что разрушает связь между уравнениями законов сохранения вещества и энергии через плотность потока. Таким образом, при рассмотрении модели теплообменника возможна декомпозиция решения, состоящая в раздельном моделировании гидродинамических и тепловых процессов. Тогда основу модели гидродинамических процессов потока будут составлять только уравнения законов сохранения вещества и количества движения.

Для принудительной циркуляции теплоносителя в трубах аэродинамической составляющей силы вдоль оси потока, возникающей за счет разности плотностей низших и высших слоев потока, можно пренебречь. Можно пренебречь и составляющей

силы тяжести, направленной вдоль потока, величина которой существенно меньше сил давления и трения. С учетом принятых допущений для гладких цилиндрических труб можно записать следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} V \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial D}{\partial z} = 0; \\ \frac{L}{f} \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} + \xi \frac{D^2}{\rho} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где L — длина трубы; f — площадь поперечного сечения; V — внутренний объем трубы; z — нормированная координата длины, изменяющаяся от 0 до 1; ξ — приведенный коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый опытным путем; D , P — массовый расход и давление среды.

В целях получения динамических характеристик линеаризуем полученную систему уравнений. С учетом принятого допущения о постоянстве температуры потока $\theta(t) = \text{const}$ рассматривается зависимость плотности только от давления $\Delta \rho = (\partial \rho / \partial P)_0 \Delta P$. Индекс «0» относится к значению величин в точке линеаризации, т.е. в исходном статическом режиме. Линеаризованную систему уравнений (1) с учетом сказанного можно записать в виде

$$\begin{cases} T_P \frac{\partial \Delta P}{\partial t} + \frac{\partial \Delta D}{\partial z} = 0; \\ k \frac{\partial \Delta D}{\partial t} + \frac{\partial \Delta P}{\partial z} - k_P \Delta P + k_D \Delta D = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В системе приняты следующие обозначения:

$$T_P = V \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_0, \left[\frac{\text{кг}}{\text{Па}} \right]; \quad k_P = \left(\frac{\partial P}{\partial P} \right)_0 \frac{(P^H - P^K)_0}{\rho_0};$$
$$k_D = 2\xi \frac{D_0}{\rho_0}, \left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{кг}} \right]; \quad k = \frac{L}{f}, [\text{м}^{-1}].$$

Коэффициент пропорциональности $k_P \ll 1$ и, как показали расчеты, практически не влияет на динамические характеристики модели, поэтому будем полагать его равным нулю.

Преобразуем систему уравнений (2) по Лапласу относительно времени и получим окончательно:

$$\begin{cases} T_P p P(p, z) + \frac{\partial D(p, z)}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial P(p, z)}{\partial z} + (k_D + kp) D(p, z) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Повторное преобразование Лапласа уравнений (3) относительно пространственной координаты z не целесообразно по той причине, что метод преобразования Лапласа требует задания двух граничных условий на входе потока в трубу ($z = 0$) — начальных расхода D^H и давления P^H , которые рассматриваются в таком случае как независимые входные воздействия. В действительности при дроссельном способе регулирования расхода эти величины зависимы. По всей видимости, следует задавать не начальные, а краевые условия в таком сочетании:

- D^H и P^K в случае изменения расхода клапаном на входе при наличии регулятора давления на выходе потока;

- D^K и P^H при наличии регулятора давления потока на входе и изменения расхода перемещением клапана на выходе.

При задании краевых условий удобнее выполнять решение системы (3) в области переменной z .

Полученные передаточные функции всех каналов сведены в табл. 1.

Таблица 1
Передаточные функции модели с
распределенными параметрами

Входы	Выходы	
	D	P
D^H	$\frac{ch[r(1-z)]}{ch(r)}$	$\frac{k_D}{r} \frac{sh[r(1-z)]}{ch(r)}$
D^K	$\frac{ch(rz)}{ch(r)}$	$-\frac{k_D}{r} \frac{sh(rz)}{ch(r)}$
P^H	$\frac{T_p p}{r} \frac{sh[r(1-z)]}{ch(r)}$	$\frac{ch[r(1-z)]}{ch(r)}$
P^K	$-\frac{T_p p}{r} \frac{sh(rz)}{ch(r)}$	$\frac{ch(rz)}{ch(r)}$

В таблице введено обозначение корня характеристического уравнения системы (3)

$$r = \sqrt{k_D T_p p + k T_p p^2}.$$

Переход к модели с сосредоточенными параметрами (точечной модели) может быть выполнен интегрированием уравнения (3) по нормированной координате z во всем диапазоне ее изменения:

$$\begin{cases} T_p p \bar{P}(p) + D^K(p) - D^H(p) = 0; \\ P^K(p) - P^H(p) + (k_D + kp) \bar{D}(p) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Допущения относительно среднеинтегральных значений принимаем в зависимости от входных воздействий (заданных граничных условий).

Для краевых условий расход на входе, давление на выходе D^H, P^K аналогом точечной гидродинамической модели является цепочка «емкость — гидравлическое сопротивление». В этом случае система уравнений (4) принимает вид:

$$\begin{cases} T_p p P^H(p) + D^K(p) - D^H(p) = 0; \\ P^K(p) - P^H(p) + (k_D + kp) D^K(p) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Если в качестве краевых условий заданы расход на выходе, давление на входе D^K, P^H , то аналогом точечной модели является цепочка «гидравлическое сопротивление — емкость». В этом случае система уравнений (4) записывается так:

$$\begin{cases} T_p p P^K(p) + D^K(p) - D^H(p) = 0; \\ P^K(p) - P^H(p) + (k_D + kp) D^H(p) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из систем уравнений (5) и (6) получаем передаточные функции всех каналов (см. табл. 2).

Таблица 2
Передаточные функции модели с
сосредоточенными параметрами

Входы	Выходы			
	D^H	D^K	P^H	P^K
D^H	1	$\frac{1}{r^2 + 1}$	$\frac{k_D + kp}{r^2 + 1}$	—
D^K	$\frac{1}{r^2 + 1}$	1	—	$-\frac{k_D + kp}{r^2 + 1}$
P^H	$\frac{T_p p}{r^2 + 1}$	—	1	$\frac{1}{r^2 + 1}$
P^K	—	$-\frac{T_p p}{r^2 + 1}$	$\frac{1}{r^2 + 1}$	1

Исследование качества различных моделей потока было проведено на примере выходного пакета пароперегревателя котла ТПП-210. Значения параметров потока пара и коэффициентов уравнений для него равны:

объем потока $V = 8,84 \text{ м}^3$; число труб $N = 476$; внутренний диаметр $d_{вн} = 20 \text{ мм}$; длина трубы $L = 24,7 \text{ м}$; общий расход пара $D = 256 \text{ кг/с}$; полный перепад давления $P^H - P^K = 1 \text{ МПа}$; частная производная плотности $(\partial \rho / \partial P)_0 = 2,5 \text{ кг/(МПа} \times \text{м}^3)$;
 $T_p = 8,84 \times 2,5 = 22 \text{ кг/МПа}$;
 $k_D = (P^H - P^K) / D = 1 / 256 = 0,004 \text{ МПа/(кг/с)}$;

$$k = \frac{L}{f} 10^{-6} = \frac{24,7 \times 4}{\pi \times 0,02^2 \times 476} 10^{-6} = 1,66 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}.$$

Множитель 10^{-6} в последнем выражении учитывает значения давления в МПа.

Годографы комплексной частотной характеристики одного из рассчитанных каналов $D^H \rightarrow D^K$ показаны на рис. 1. Из рисунка видно, что точность модели с сосредоточенными параметрами (кривая СП) не может быть признана удовлетворительной, за исключением малой окрестности в начальной точке $\omega = 0$. Использование модели с распределенными параметрами (кривая РП) выявило наличие резонансных свойств парового потока. В окрестности резонансных частот амплитуда колебаний расхода на выходе превышает амплитуду колебаний расхода на входе в трубу.

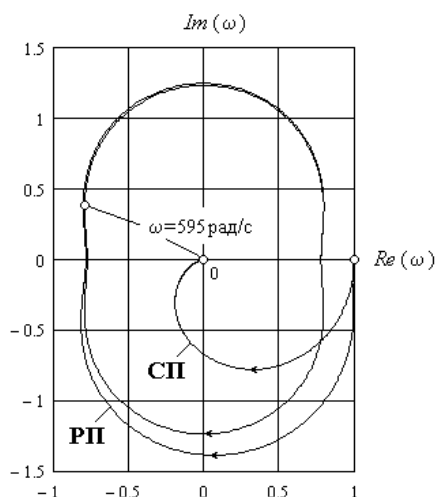


Рис. 1. Комплексные частотные характеристики канала $D^H \rightarrow D^K$

РП — модель с распределенными параметрами,
СП — модель с сосредоточенными параметрами

На годографах рис. 1 отмечена контрольная точка, соответствующая номинальной частоте вращения питательного турбонасоса $\omega = 595$ рад/с ($n_{\text{ном}} = 5691$ об/мин). Если модель с сосредоточенными параметрами показывает полную фильтрацию пульсаций расхода, связанных с работой турбонасоса, то в действительности такие пульсации практически не подавляются паровым потоком.

Низкую точность модели с сосредоточенными параметрами показали и при расчете частотных характеристик остальных каналов, из чего можно сделать вывод, что принятые в инженерной практике простейшие модели в лучшем случае могут использоваться для расчета статики.

2. ВЛИЯНИЕ СЖИМАЕМОСТИ ПОТОКА НА РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА

Определенный интерес представляет влияние сжимаемости потока $\partial p / \partial P$ на вид динамических характеристик.

На рис. 2 показаны годографы комплексных частотных характеристик канала расхода $D^H \rightarrow D^K$ модели с распределенными параметрами (3) для различных значений параметра $T_P = V(\partial p / \partial P)_0$.

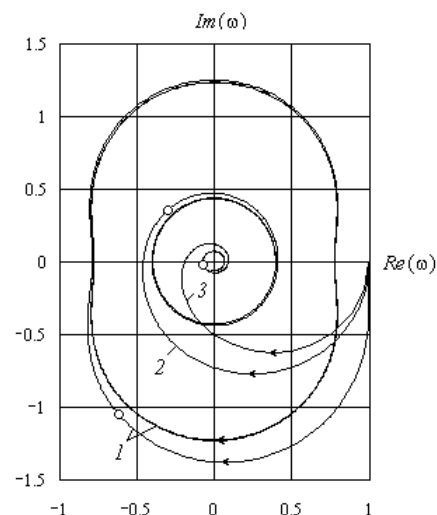


Рис. 2. Годографы комплексных частотных характеристик расходного канала $D^H \rightarrow D^K$

1 — $T_P = 22$; 2 — $T_P = 100$; 3 — $T_P = 500$

○ — контрольная точка $\omega = 30$ рад/с

Годограф 1 рассчитан для значения $T_P = 22$, характерного для паровой среды. Годографы 2 и 3 рассчитаны для значений $T_P = 100$ и $T_P = 500$, характерных для газовых сред (воздух, дымовые газы), сжимаемость которых на порядок больше сжимаемости пара. На графике отмечена контрольная точка $\omega = 30$ рад/с.

Анализ кривых показывает, что при увеличении сжимаемости резонансные свойства потока пропадают (годографы 2 и 3).

Все характеристики в большей или меньшей степени проявляют периодическую составляющую (асимптотические окружности комплексных частотных характеристик), связанную с ограниченной скоростью распространения волны изменения расхода и давления вследствие сжимаемости потока. Так, для рассмотренного примера паровой среды (кривая 1) эта скорость составила 410 м/с.

3. ВЛИЯНИЕ КОЛЛЕКТОРОВ НА РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ПОТОКА

Наличие сборных и распределительных коллекторов реальных теплообменников сглаживает проявление резонансных свойств потока в трубах.

Коллекторы представляют собой некоторые ёмкости, поэтому при их описании используем упрощенные модели с сосредоточенными параметрами для $k = 0$ (см. табл. 2).

Определим параметры передаточных функций для четырех входных коллекторов $N_1 = 4$ пароперегревателя котла ТПП-210 с внутренним диаметром $d_1 = 0,173$ м, длиной $l_1 = 7,86$ м и суммарным расходом пара $D = 256$ кг/с. Потерю давления свяжем с двумя местными сопротивлениями в местах стыковки входных и выходных труб с коллектором. Согласно рекомендациям [2], перепад давления вычисляется по формуле:

$$P_1^H - P_1^K = \xi_m \frac{D^2}{\rho} \cdot 10^{-6} = 1 \cdot \frac{256^2}{93,32} \cdot 10^{-6} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ МПа},$$

где эквивалентный коэффициент местного сопротивления $\xi_m = 1$ (см. табл. 1.7 [2]). Тогда

$$(k_D)_1 = \frac{P_1^H - P_1^K}{D} = \frac{7 \cdot 10^{-4}}{256} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ МПа/(кг/с)};$$

$$(T_P)_1 = N_1 \frac{\pi d_1^2}{4} l_1 \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_1 = 0,73 \cdot 2,5 = 1,847 \text{ кг/МПа}.$$

Аналогичным образом вычисляются коэффициенты дифференциальных уравнений для выходных коллекторов, которые отличаются от входных лишь длиной труб $l_2 = 6,86$ м:

$$(k_D)_2 = (k_D)_1 = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ МПа/(кг/с)};$$

$$(T_P)_2 = 1,61 \text{ кг/МПа}.$$

Сигнальный граф поверхности нагрева с коллекторами пара на входе и выходе показан на рис. 3.

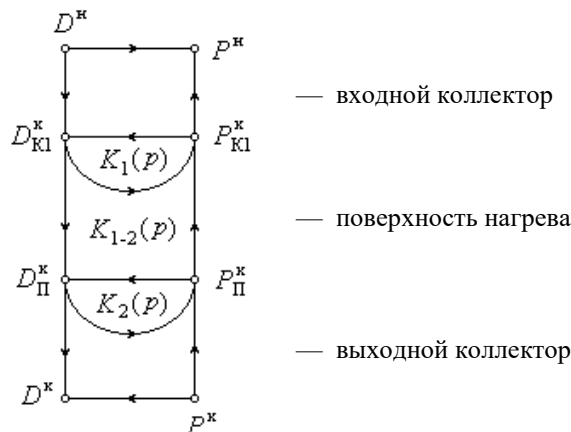


Рис. 3. Сигнальный граф поверхности с коллекторами

Используя топологическую формулу Мэйсона, запишем выражение для передаточной функции канала изменения расхода на входе первого и на выходе второго коллекторов $D^H \rightarrow D^K$:

$$W_{D^H D^K}(p) = \frac{W_{DD}^{K1}(p) W_{DD}^{\Pi}(p) W_{DD}^{K2}(p)}{\Delta(p)}, \quad (7)$$

где

$$\Delta(p) = 1 - K_1(p) - K_2(p) - K_{1-2}(p) + K_1(p)K_2(p)$$

— определитель сигнального графа;

$K_1(p) = W_{PD}^{K1}(p) W_{DP}^{\Pi}(p)$ — передаточная функция первого контура;

$K_2(p) = W_{DP}^{K2}(p) W_{PD}^{\Pi}(p)$ — передаточная функция второго контура;

$K_{1-2}(p) = W_{PD}^{K1}(p) W_{DD}^{\Pi}(p) W_{DP}^{K2}(p) W_{PP}^{\Pi}(p)$ — передаточная функция третьего контура, образованного из обоих коллекторов и поверхности нагрева.

Входящие в формулу (7) составляющие в виде передаточных функций отдельных каналов имеют следующие численные выражения:

- для поверхности нагрева

$$W_{DD}^{\Pi}(p) = W_{PP}^{\Pi}(p) = \frac{1}{ch(r)},$$

$$W_{DP}^{\Pi}(p) = \frac{0,004}{r} \frac{sh(r)}{ch(r)},$$

$$W_{PD}^{\Pi}(p) = -\frac{22,0 p}{r} \frac{sh(rz)}{ch(r)},$$

$$\text{где } r = \sqrt{8,8 \cdot 10^{-2} p + 3,7 \cdot 10^{-3} p^2};$$

- для входного коллектора

$$W_{DD}^{K1}(p) = \frac{1}{4,99 \cdot 10^{-6} p + 1},$$

$$W_{PD}^{K1}(p) = \frac{-1,847 p}{4,99 \cdot 10^{-6} p + 1};$$

- для выходного коллектора

$$W_{DD}^{K2}(p) = \frac{1}{4,35 \cdot 10^{-6} p + 1},$$

$$W_{DP}^{K2}(p) = \frac{2,7 \cdot 10^{-6}}{4,35 \cdot 10^{-6} p + 1}.$$

На рис. 4 представлены годографы комплексных частотных характеристик выходного пакета пароперегревателя с учетом коллекторов (кривая 1) и без коллекторов (кривая 2). На кривых отмечена контрольная точка $\omega_K = 595$ рад/с, соответствующая номинальной частоте вращения питательного турбонасоса.

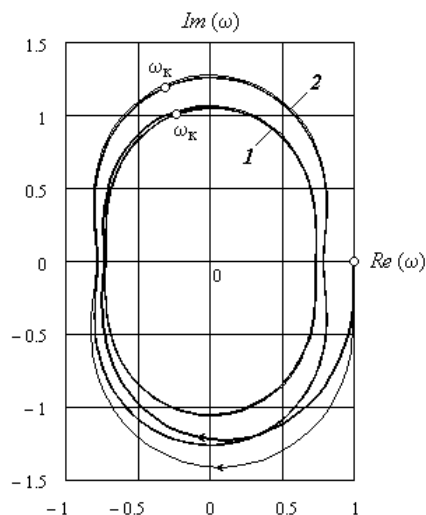


Рис. 4. Комплексные частотные характеристики канала $D^H \rightarrow D^K$

1 — поверхность с коллекторами;

2 — поверхность без коллекторов

○ — контрольная точка $\omega_K = 595$ рад/с

Как видно из рисунка, наличие сборных и распределительных коллекторов реальных теплообменников несколько сглаживает резонансные свойства потока в трубах, не снимая проблемы гидродинамических колебаний.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования различных моделей гидродинамики парового потока показали, что применение моделей с сосредоточенными параметрами по сравнению с моделями с распределёнными параметрами даёт лишь качественное представление о динамике и может использоваться скорее для расчётов статики.

Модели с распределёнными параметрами выявили возможность возникновения резонансных свойств паровых потоков.

Наличие сборных и распределительных коллекторов реальных теплообменников несколько сглаживает резонансные свойства потока в трубах, не снимая проблемы гидродинамических колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикина Г.А. Математические модели технологических объектов: учебное пособие / Под ред. А. В. Андрияшина. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 300 с.
2. Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник. / Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 557 с.

СПОСОБНОСТЬ АНАЛИТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ОТРАЖАТЬ ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОТЛОВ

АННОТАЦИЯ

Использование моделей с распределенными параметрами гидродинамических процессов поверхностей нагрева котлов позволило выявить специфические особенности, в частности возможность появления резонансных свойств при слабой сжимаемости потока. Показано, что по сравнению с принятыми в работе моделями ранее применявшиеся в инженерной практике модели с сосредоточенными параметрами способны отражать гидродинамические характеристики лишь качественно и могут быть пригодными только для описания статических режимов. Выполнено исследование влияния коллекторов, конструктивных и технологических параметров теплообменника на резонансные свойства потока.

МОДЕЛИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ И СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

При построении аналитических моделей теплообменников в инженерной практике используются обыкновенные дифференциальные уравнения гидродинамики (точечные модели) или просто алгебраические уравнения (статические модели). Возможность такого упрощения может быть обоснована в результате сравнения динамических характеристик упрощенной модели с характеристиками более совершенных моделей [1] в виде дифференциальных уравнений в частных производных (моделей с распределенными параметрами). Целью данной работы является анализ способности различных аналитических моделей отражать особенности гидродинамических характеристик котлов.

Учтем, что скорость распространения тепловых процессов равна скорости движения потока в трубе, в то время как скорость распространения гидродинамических процессов равна скорости звука в потоке, т.е. гидродинамические процессы протекают на один — два порядка быстрее, чем тепловые. Это обстоятельство позволяет считать, что за время переходного процесса изменения расхода и давления температура потока не успевает измениться, что разрушает связь между уравнениями законов сохранения вещества и энергии через плотность потока. Таким образом, при рассмотрении модели теплообменника возможна декомпозиция решения, состоящая в раздельном моделировании гидродинамических и тепловых процессов. Тогда основу модели гидродинамических процессов потока будут составлять только уравнения законов сохранения вещества и количества движения.

Для принудительной циркуляции теплоносителя в трубах аэродинамической составляющей силы вдоль оси потока, возникающей за счет разности плотностей низших и высших слоев потока, можно пренебречь. Можно пренебречь и составляющей силы тяжести, направленной вдоль потока, величина которой существенно меньше сил давления и трения. С учетом принятых допущений для гладких цилиндрических труб можно записать следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} V \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial D}{\partial z} = 0; \\ \frac{L}{f} \frac{\partial D}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial z} + \xi \frac{D^2}{\rho} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где L — длина трубы; f — площадь поперечного сечения; V — внутренний объем трубы; z — нормированная координата длины, изменяющаяся от 0 до 1; ξ — приведенный коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый опытным путем; D , P — массовый расход и давление среды.

В целях получения динамических характеристик линеаризуем полученную систему уравнений. С учетом принятого допущения о постоянстве температуры потока $\theta(t) = \text{const}$ рассматривается зависимость плотности только от давления $\Delta \rho = (\partial \rho / \partial P)_0 \Delta P$. Индекс «0» относится к значению величин в точке линеаризации, т.е. в исходном статическом режиме. Линеаризованную систему уравнений (1) с учетом сказанного можно записать в виде

$$\begin{cases} T_P \frac{\partial \Delta P}{\partial t} + \frac{\partial \Delta D}{\partial z} = 0; \\ k \frac{\partial \Delta D}{\partial t} + \frac{\partial \Delta P}{\partial z} - k_P \Delta P + k_D \Delta D = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В системе приняты следующие обозначения:

$$T_P = V \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_0, \left[\frac{\text{кг}}{\text{Па}} \right]; \quad k_P = \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_0 \frac{(P^H - P^K)_0}{\rho_0}; \quad k_D = 2\xi \frac{D_0}{\rho_0}, \left[\frac{\text{Па} \cdot \text{с}}{\text{кг}} \right]; \quad k = \frac{L}{f}, \left[\text{м}^{-1} \right].$$

Коэффициент пропорциональности $k_P \ll 1$ и, как показали расчеты, практически не влияет на динамические характеристики модели, поэтому будем полагать его равным нулю.

Преобразуем систему уравнений (2) по Лапласу относительно времени и получим окончательно:

$$\begin{cases} T_P p P(p, z) + \frac{\partial D(p, z)}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial P(p, z)}{\partial z} + (k_D + kp) D(p, z) = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Повторное преобразование Лапласа уравнений (3) относительно пространственной координаты z не целесообразно по той причине, что метод преобразования Лапласа требует задания двух граничных условий на входе потока в трубу ($z = 0$) — начальных расхода D^H и давления P^H , которые рассматриваются в таком случае как независимые входные воздействия. В действительности при дроссельном способе регулирования расхода эти величины зависимы. По всей видимости, следует задавать не начальные, а краевые условия в таком сочетании:

- D^H и P^K в случае изменения расхода клапаном на входе при наличии регулятора давления на выходе потока;
- D^K и P^H при наличии регулятора давления потока на входе и изменения расхода перемещением клапана на выходе.

При задании краевых условий удобнее выполнять решение системы (3) в области переменной z .

Полученные передаточные функции всех каналов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Передаточные функции модели с распределенными параметрами

Входы	Выходы	
	D	P
D^H	$\frac{ch[r(1-z)]}{ch(r)}$	$\frac{k_D}{r} \frac{sh[r(1-z)]}{ch(r)}$
D^K	$\frac{ch(rz)}{ch(r)}$	$-\frac{k_D}{r} \frac{sh(rz)}{ch(r)}$
P^H	$\frac{T_P p}{r} \frac{sh[r(1-z)]}{ch(r)}$	$\frac{ch[r(1-z)]}{ch(r)}$
P^K	$-\frac{T_P p}{r} \frac{sh(rz)}{ch(r)}$	$\frac{ch(rz)}{ch(r)}$

В таблице введено обозначение корня характеристического уравнения системы (3)

$$r = \sqrt{k_D T_P p + k T_P p^2}.$$

Переход к модели с сосредоточенными параметрами (точечной модели) может быть выполнен интегрированием уравнения (3) по нормированной координате z во всем диапазоне ее изменения:

$$\begin{cases} T_p p \bar{P}(p) + D^k(p) - D^h(p) = 0; \\ P^k(p) - P^h(p) + (k_D + kp) \bar{D}(p) = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Допущения относительно среднеинтегральных значений принимаем в зависимости от входных воздействий (заданных граничных условий).

Для краевых условий расход на входе, давление на выходе D^h, P^k аналогом точечной гидродинамической модели является цепочка «емкость — гидравлическое сопротивление». В этом случае система уравнений (4) принимает вид:

$$\begin{cases} T_p p P^h(p) + D^k(p) - D^h(p) = 0; \\ P^k(p) - P^h(p) + (k_D + kp) D^k(p) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Если в качестве краевых условий заданы расход на выходе, давление на входе D^k, P^h , то аналогом точечной модели является цепочка «гидравлическое сопротивление — емкость». В этом случае система уравнений (4) записывается так:

$$\begin{cases} T_p p P^k(p) + D^k(p) - D^h(p) = 0; \\ P^k(p) - P^h(p) + (k_D + kp) D^h(p) = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Из систем уравнений (5) и (6) получаем передаточные функции всех каналов (см. табл. 2).

Таблица 2

Передаточные функции модели с сосредоточенными параметрами

Входы	Выходы			
	D^h	D^k	P^h	P^k
D^h	1	$\frac{1}{r^2 + 1}$	$\frac{k_D + kp}{r^2 + 1}$	—
D^k	$\frac{1}{r^2 + 1}$	1	—	$-\frac{k_D + kp}{r^2 + 1}$
P^h	$\frac{T_p p}{r^2 + 1}$	—	1	$\frac{1}{r^2 + 1}$
P^k	—	$-\frac{T_p p}{r^2 + 1}$	$\frac{1}{r^2 + 1}$	1

Исследование качества различных моделей потока было проведено на примере выходного пакета пароперегревателя котла ТПП-210. Значения параметров потока пара и коэффициентов уравнений для него равны:

объем потока $V = 8,84 \text{ м}^3$; число труб $N = 476$; внутренний диаметр $d_{\text{вн}} = 20 \text{ мм}$; длина трубы $L = 24,7 \text{ м}$; расход пара $D = 256 \text{ кг/с}$; полный перепад давления $P^h - P^k = 1 \text{ МПа}$; частная производная плотности по давлению $(\partial \rho / \partial P)_0 = 2,5 \text{ кг/(МПа} \times \text{м}^3)$; $T_p = 8,84 \times 2,5 = 22 \text{ кг/МПа}$;

$$k_D = \frac{P^h - P^k}{D} = \frac{1}{256} = 0,004 \text{ МПа/(кг/с)}; \quad k = \frac{L}{f} 10^{-6} = \frac{24,7 \times 4}{\pi \times 0,02^2 \times 476} 10^{-6} = 1,66 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}.$$

Множитель 10^{-6} в последнем выражении учитывает значения давления в МПа.

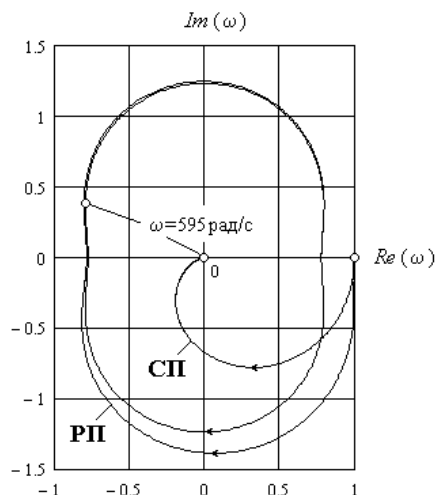


Рис. 1. Комплексные частотные характеристики канала $D^H \rightarrow D^K$

РП — модель с распределенными параметрами,
СП — модель с сосредоточенными параметрами

Годографы комплексной частотной характеристики одного из рассчитанных каналов $D^H \rightarrow D^K$ показаны на рис. 1. Из рисунка видно, что точность модели с сосредоточенными параметрами (кривая СП) не может быть признана удовлетворительной, за исключением малой окрестности в начальной точке $\omega = 0$. Использование модели с распределенными параметрами (кривая РП) выявило наличие резонансных свойств парового потока. В окрестности резонансных частот амплитуда колебаний расхода на выходе превышает амплитуду колебаний расхода на входе в трубу.

На годографах рис. 1 отмечена контрольная точка, соответствующая номинальной частоте вращения питательного турбонасоса $\omega = 595$ рад/с ($n_{\text{ном}} = 5691$ об/мин). Если модель с сосредоточенными параметрами показывает полную фильтрацию пульсаций расхода, связанных с работой турбонасоса, то в действительности такие пульсации практически не подавляются паровым потоком.

Низкую точность модели с сосредоточенными параметрами показали и при расчете частотных характеристик остальных каналов, из чего можно сделать вывод, что принятые в инженерной практике простейшие модели в лучшем случае могут использоваться для расчета статики.

ВЛИЯНИЕ СЖИМАЕМОСТИ ПОТОКА НА РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА

Определенный интерес представляет влияние сжимаемости потока $\partial \rho / \partial P$ на вид динамических характеристик.

На рис. 2 показаны годографы комплексных частотных характеристик канала расхода $D^H \rightarrow D^K$ модели с распределенными параметрами (3) для различных значений параметра $T_p = V(\partial \rho / \partial P)_0$.

Годограф 1 рассчитан для значения $T_p = 22$, характерного для паровой среды. Годографы 2 и 3 рассчитаны для значений $T_p = 100$ и $T_p = 500$, характерных для газовых сред (воздух, дымовые газы), сжимаемость которых на порядок больше сжимаемости пара. На графике отмечена контрольная точка $\omega = 30$ рад/с.

Анализ кривых показывает, что при увеличении сжимаемости резонансные свойства потока пропадают (годографы 2 и 3).

Все характеристики в большей или меньшей степени проявляют периодическую составляющую (асимптотические окружности комплексных частотных характеристик), связанную с ограниченной скоростью распространения волны изменения расхода и давления вследствие сжимаемости потока. Так, для рассмотренного примера паровой среды (кривая 1) эта скорость составила 410 м/с.

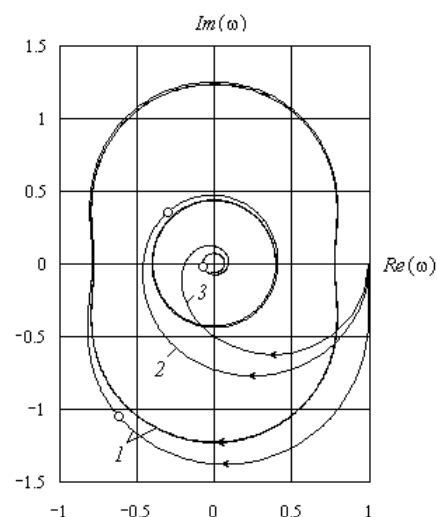


Рис. 2. Годографы комплексных частотных характеристик расходного канала $D^H \rightarrow D^K$

1 — $T_p = 22$; 2 — $T_p = 100$; 3 — $T_p = 500$
○ — контрольная точка $\omega = 30$ рад/с

ВЛИЯНИЕ КОЛЛЕКТОРОВ НА РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА ПОТОКА

Наличие сборных и распределительных коллекторов реальных теплообменников сглаживает проявление резонансных свойств потока в трубах.

Коллекторы представляют собой некоторые ёмкости, поэтому при их описании используем упрощенные модели с сосредоточенными параметрами для $k = 0$ (см. табл. 2).

Определим параметры передаточных функций для четырех входных коллекторов $N_1 = 4$ пароперегревателя котла ТПП-210 с внутренним диаметром $d_1 = 0,173$ м, длиной $l_1 = 7,86$ м и суммарным расходом пара $D = 256$ кг/с. Потерю давления свяжем с двумя местными сопротивлениями в местах стыковки входных и выходных труб с коллектором. Согласно рекомендациям [2], перепад давления вычисляется по формуле:

$$P_1^H - P_1^K = \xi_M \frac{D^2}{\rho} \cdot 10^{-6} = 1 \cdot \frac{256^2}{93,32} \cdot 10^{-6} = 7 \cdot 10^{-4} \text{ МПа},$$

где эквивалентный коэффициент местного сопротивления $\xi_M = 1$ (см. табл. 1.7 [2]). Тогда

$$(k_D)_1 = \frac{P_1^H - P_1^K}{D} = \frac{7 \cdot 10^{-4}}{256} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ МПа/(кг/с)};$$

$$(T_P)_1 = N_1 \frac{\pi d_1^2}{4} l_1 \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_1 = 0,73 \cdot 2,5 = 1,847 \text{ кг/МПа}.$$

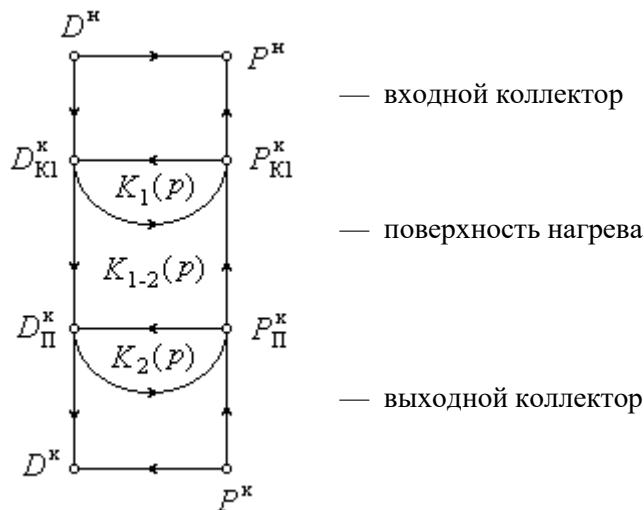


Рис. 3. Сигнальный граф поверхности с коллекторами

Аналогичным образом вычисляются коэффициенты дифференциальных уравнений для выходных коллекторов, которые отличаются от входных лишь длиной труб $l_2 = 6,86$ м:

$$(k_D)_2 = (k_D)_1 = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ МПа/(кг/с)};$$

$$(T_P)_2 = 1,61 \text{ кг/МПа}.$$

Сигнальный граф поверхности нагрева с коллекторами пара на входе и выходе показан на рис. 3.

Используя топологическую формулу Мэйсона, запишем выражение для передаточной функции канала изменения расхода на входе первого и на выходе второго коллекторов $D^H \rightarrow D^K$:

$$W_{D^H D^K}(p) = \frac{W_{DD}^{K1}(p) W_{DD}^{\Pi}(p) W_{DD}^{K2}(p)}{\Delta(p)}, \quad (7)$$

где $\Delta(p) = 1 - K_1(p) - K_2(p) - K_{1-2}(p) + K_1(p)K_2(p)$ — определитель сигнального графа;

$K_1(p) = W_{PD}^{K1}(p) W_{DP}^{\Pi}(p)$ — передаточная функция первого контура;

$K_2(p) = W_{DP}^{K2}(p) W_{PD}^{\Pi}(p)$ — передаточная функция второго контура;

$K_{1-2}(p) = W_{PD}^{K1}(p) W_{DD}^{\Pi}(p) W_{DP}^{K2}(p) W_{PP}^{\Pi}(p)$ — передаточная функция третьего контура, образованного из обоих коллекторов и поверхности нагрева.

Входящие в формулу (7) составляющие в виде передаточных функций отдельных каналов имеют следующие численные выражения:

- для поверхности нагрева

$$W_{DD}^{\Pi}(p) = W_{PP}^{\Pi}(p) = \frac{1}{ch(r)}, \quad W_{DP}^{\Pi}(p) = \frac{0,004}{r} \frac{sh(r)}{ch(r)}, \quad W_{PD}^{\Pi}(p) = -\frac{22,0}{r} \frac{p}{ch(r)},$$

где $r = \sqrt{8,8 \cdot 10^{-2} p + 3,7 \cdot 10^{-3} p^2}$;

- для входного и выходного коллекторов

$$W_{DD}^{K1}(p) = \frac{1}{4,99 \cdot 10^{-6} p + 1}, \quad W_{PD}^{K1}(p) = \frac{-1,847 p}{4,99 \cdot 10^{-6} p + 1},$$

$$W_{DD}^{K2}(p) = \frac{1}{4,35 \cdot 10^{-6} p + 1}, \quad W_{DP}^{K2}(p) = \frac{2,7 \cdot 10^{-6}}{4,35 \cdot 10^{-6} p + 1}.$$

На рис. 4 показаны комплексные частотные характеристики выходного пакета пароперегревателя с учетом коллекторов (кривая 1) и без коллекторов (кривая 2), на которых отмечена контрольная точка $\omega_k = 595$ рад/с.

Как видно из рисунка, наличие сборных и распределительных коллекторов реальных теплообменников несколько сглаживает резонансные свойства потока в трубах, не снимая проблемы гидродинамических колебаний.

ВЫВОДЫ

1. Выполненные исследования различных моделей гидродинамики парового потока показали, что применение моделей с сосредоточенными параметрами по сравнению с моделями с распределёнными параметрами даёт лишь качественное представление о динамике и может использоваться скорее для расчётов статики.

2. Модели с распределёнными параметрами выявили возможность возникновения резонансных свойств паровых потоков.

3. Наличие сборных и распределительных коллекторов реальных теплообменников несколько сглаживает резонансные свойства потока в трубах, не снимая проблемы гидродинамических колебаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикина Г.А. Математические модели технологических объектов : учебное пособие / Под ред. А. В. Андрияшина. М.: Изд. дом МЭИ, 2007. 300 с.

2. Тепло и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник. / Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 557 с.

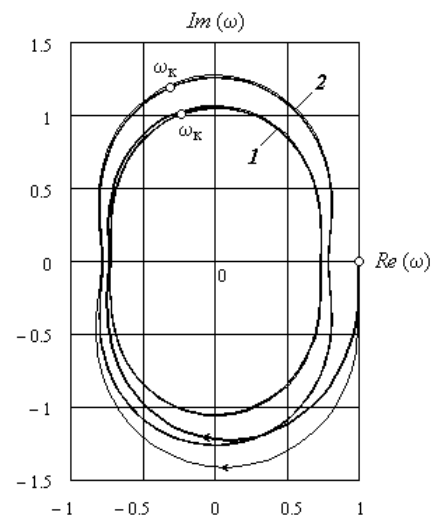


Рис. 4. Комплексные частотные характеристики канала $D^H \rightarrow D^K$

- 1 — поверхность с коллекторами;
- 2 — поверхность без коллекторов
- — контрольная точка $\omega_k = 595$ рад/с

МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ МАЛЫХ И СРЕДНИХ КОМПАНИЙ, РАБОТАЮЩИХ В СФЕРЕ УСЛУГ НА РЫНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНЖИНИРИНГА

Полушкина Е.Н.

ПРЕДМЕТ РАЗРАБОТКИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОМПАНИИ, РАБОТАЮЩЕЙ В СФЕРЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛУГ НА РЫНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНЖИНИРИНГА, А ТАКЖЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПУТИ РАЗВИТИЯ КОМПАНИИ В СООТВЕТСТВИИ С ВЫБРАННЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ.

АКТУАЛЬНОСТЬ

С 2006г. РЫНОК ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНЖИНИРИНГА, ПОСЛЕ ПЕРИОДА В СТАГНАЦИИ 90-ХХ ГГ. XIXв. – НАЧАЛЕ XXв., ПЕРЕШЁЛ В СТАДИЮ АКТИВНОГО РОСТА, ВЫЗВАННОГО УТВЕРЖДЕНИЕМ «ФЕДЕРАЛЬНОЙ ЦЕЛЕВОЙ ПРОГРАММЫ "РАЗВИТИЕ АТОМНОГО ЭНЕРГОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА РОССИИ НА 2007-2010 ГОДЫ И НА ПЕРСПЕКТИВУ ДО 2015 ГОДА"; ПРИНЯТИЕМ РАО «ЕЭС РОССИИ» МАСШТАБНОЙ ИНВЕСТИЦИОННОЙ ПРОГРАММЫ; ОДОБРЕНИЕМ ПРАВИТЕЛЬСТВОМ РФ «ГЕНЕРАЛЬНОЙ СХЕМЫ РАЗМЕЩЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ ДО 2020 ГОДА», КОТОРОЙ ПРЕДУСМОТРЕН ВВОД 186 ГВт ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ДО 2020г., т.ч. 49ГВт – мощности ТЭЦ, 137 ГВт – мощности ГЭС, АЭС, КЭС.

В СВЯЗИ С РЕФОРМИРОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ 1 ИЮЛЯ 2008г. ПРЕКРАТИЛО СВОЁ СУЩЕСТВОВАНИЕ РАО «ЕЭС РОССИИ», А СТРАТЕГИЧЕСКИМИ ИНВЕСТОРАМИ БОЛЬШИНСТВА ОГК И ТГК СТАЛИ ДРУГИЕ (ЧАСТНЫЕ И ГОСУДАРСТВЕННЫЕ) КОМПАНИИ. ПРИХОД СТРАТЕГИЧЕСКИХ ИНВЕСТОРОВ ОБУСЛОВИЛ ФОРМИРОВАНИЕ СПРОСА ОГК И ТГК НА НОВЫЕ УСЛУГИ, А ТАКЖЕ ИЗМЕНЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ ОГК И ТГК К КОМПАНИЯМ, РАБОТАЮЩИМ НА РЫНКЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНЖИНИРИНГА.

В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ РЫНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ИНЖИНИРИНГА ПРОИЗОШЛО ВЫДЕЛЕНИЕ СЛЕДУЮЩИХ ГРУПП УЧАСТНИКОВ РЫНКА: ГРУППА КРУПНЫХ ГЕНПОДРЯДНЫХ КОМПАНИЙ, РЕАЛИЗУЮЩИХ ПРОЕКТЫ НОВОГО СТРОИТЕЛЬСТВА; ГРУППА ПОСТАВЩИКОВ ОБОРУДОВАНИЯ; ГРУППЫ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ РЕГИОНАЛЬНЫХ КОМПАНИЙ, РАБОТАЮЩИХ НА СУБПОДРЯДЕ У КРУПНЫХ КОМПАНИЙ (ПО МАСШТАБНЫМ ПРОЕКТАМ), А ТАКЖЕ УЧАСТВУЮЩИХ В ПРОЕКТАХ ТЕХНИЧЕСКОГО ПЕРЕВООРУЖЕНИЯ И МОДЕРНИЗАЦИИ.

ОПЫТ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ СТРОИТЕЛЬСТВА ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ПОКАЗЫВАЕТ, ЧТО ЗНАЧИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ МАЛЫХ И СРЕДНИХ КОМПАНИЙ НЕ ГОТОВА К РАБОТЕ С КРУПНЫМИ ГЕНПОДРЯДНЫМИ КОМПАНИЯМИ, НЕ ЗАРЕШАЕТ О ПОЯВЛЕНИИ СПРОСА НА НОВЫЕ УСЛУГИ, НЕ СООТВЕТСТВУЕТ ИЗМЕНИВШИМСЯ ТРЕБОВАНИЯМ КЛИЕНТА. ОДНОЙ ИЗ ГЛАВНЫХ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ТАКОЙ СИТУАЦИИ ЯВЛЯЕТСЯ ОТСУТСТВИЕ У РУКОВОДСТВА КОМПАНИЙ РЫНОЧНОГО, КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА К РАЗВИТИЮ БИЗНЕСА. СИТУАЦИЯ УСУГУБЛЯЕТСЯ ТЕМ, ЧТО ЗНАЧИТЕЛЬНУЮ ЧАСТЬ МЕТОДОВ И ИНСТРУМЕНТАРИЯ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АНАЛОГИЧНЫХ СИТУАЦИЯХ НА РЫНКАХ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ТОВАРОВ И УСЛУГ, ДОСТАТОЧНО СЛОЖНО ИЛИ НЕЦЕЛЕСООБРАЗНО ПРИМЕНЯТЬ В СФЕРЕ ПРОМЫШЛЕННЫХ (B2B) УСЛУГ.

НЕОБХОДИМОСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ РЫНОЧНОГО, КЛИЕНТООРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА, СОЗДАЁТ ПОТРЕБНОСТЬ В РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОВ И ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИОРИТЕТНОГО НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ КОМПАНИИ, РАБОТАЮЩЕЙ В СФЕРЕ B2B-УСЛУГ, А ТАКЖЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПУТИ ЕЁ РАЗВИТИЯ В СООТВЕТСТВИИ С ВЫБРАННЫМ ПРИОРИТЕТНЫМ НАПРАВЛЕНИЕМ.

ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С 2006 года в рамках реализации настоящего проекта были разработаны:

- ✓ Основные подходы к определению изменения спроса на рынке энергетического инжиниринга, а также методика оценки объёма рынка в сфере B2B-услуг на рынке энергетического инжиниринга;
- ✓ Методика формирования карты отрасли, а также статической и динамической карт стратегических групп отрасли в сфере B2B-услуг на рынке энергетического инжиниринга;
- ✓ Методика формирования управленческой отчётности, позволяющая оценить структуру контрактации и выручки компании в разрезах, необходимых для определения оптимального направления развития;
- ✓ Методика и формат оценки целесообразности приобретения компаний.

Направления развития

Исходя из состава актуальных задач, перспективными направлениями развития проекта являются:

- ✓ Создание методики развития в компании функций, позволяющих перейти к рыночному, клиентоориентированному подходу в развитии компании, в зависимости от исходного уровня развития этих функций;
- ✓ Формирование экономической модели, устанавливающей взаимосвязь рыночной и экономической составляющие развития компании, и позволяющей определить оптимальное направления развития;
- ✓ Разработка методики определения пути развития компании в соответствии с выбранным оптимальным направлением;
- ✓ Разработка для представителей бизнеса и студентов профильных учебных заведений вариантов учебного курса «Рыночный подход к развитию компании, работающей в сфере B2B-услуг».

А.И. Репин, Н.И. Смирнов, В.Р. Сабанин
 Московский энергетический институт (технический университет)
А.Н. Максимов, А.Н. Игнатенко (ЗАО “ПРОМЭЛЕКТРОНИКА”)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АЛГОРИТМОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ И АДАПТАЦИИ АСР И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В СОВРЕМЕННЫХ ПТК

АННОТАЦИЯ

Рассматривается способ реализации адаптивных автоматических систем регулирования (АСР) в программно-технических комплексах АСУТП. Самонастройка и адаптация АСР осуществляется с помощью активной идентификации с использованием приемов имитационного моделирования и авторской версии эволюционного алгоритма оптимизации “Optim-MGA”. Алгоритмы идентификации и адаптации реализованы в программном продукте “Tune P.I.D.”. Приводится принцип работы программы и описание её взаимодействия с программно-техническим комплексом (ПТК).

Изменение динамических характеристик промышленных объектов в процессе их функционирования делает первоначально настроенный автоматический регулятор в лучшем случае не оптимальным, а в худшем случае не работоспособным. В связи с этим вполне закономерен интерес к разработке и внедрению алгоритмов адаптации [1].

Большинство существующих способов адаптивного управления предполагают наличие адекватного математического описания объекта регулирования и построенной на его основе имитационной модели системы.

Структурная схема идентификации объекта регулирования представлена на рис.1.

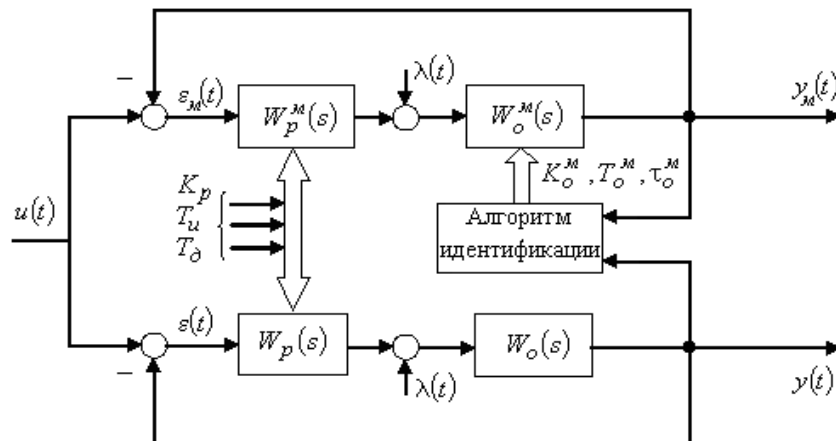


Рис.1. Структурная схема идентификации

Процедуру идентификации следует выполнять периодически и первый раз при пуске системы. Ниже, в соответствии с рис.1, приводится последовательность основных операций идентификации.

- На регуляторе $W_p(s)$ и его модели $W_p^M(s)$ устанавливаются настроечные параметры, заведомо гарантирующие достаточный запас устойчивости, после чего регулятор включается в работу;
- На вход регулятора подается ступенчатое идентифицирующее воздействие по заданию $u(t)$, необходимое для формирования выборки регулируемого параметра $y(t)$;
- Производится запись в базу данных величины возмущения $u(i \cdot \Delta t)$, выборки регулируемого параметра $y(i \cdot \Delta t)$ и фиксированных интервалов времени $i \cdot \Delta t$;
- Реализуется процедура параметрической идентификации для принятой структуры модели объекта $W_o^M(s)$.

С позиций системного подхода модель объекта будет считаться удовлетворительной, если при подаче на вход системы с действительным объектом и системы с моделью объекта одного и того же воздействия разность их выходных величин окажется достаточно малой. Критерий идентификации $I_{u\partial}$ формируется в виде интеграла квадратов разности выходов реальной АСП $y(t)$ и ее модели $y_M(t)$:

$$I_{u\partial} = \int_0^{2 \cdot \tau_{nn}} \{y_M(t) - y(t)\}^2 dt \rightarrow \min \quad . \quad (1)$$

После того, как параметры для принятой структуры математической модели объекта будут определены, осуществляется процедура параметрической оптимизации выбранного регулятора в среде имитационного моделирования. Структурная схема этой процедуры представлена на рис. 2.

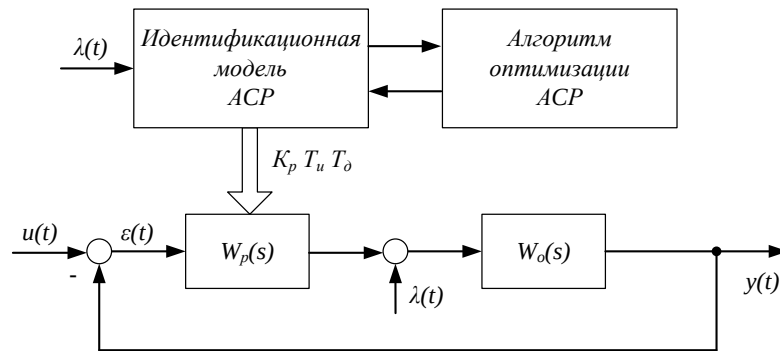


Рис. 2. Структурная схема параметрической оптимизации регулятора

В качестве критерия в алгоритме параметрической оптимизации регулятора выбран интеграл по модулю отклонения регулируемой величины в переходном процессе при ступенчатом возмущении по каналу регулирующего органа $\lambda(t)$:

$$I_{M,\lambda} = \int_0^{\tau_{nn}} \lambda(t) \cdot |y_M(t)| \cdot dt \rightarrow \min \quad , \quad (2)$$

где $y_M(t)$ – регулируемый параметр на выходе модели; τ_{nn} – интервал времени переходного процесса.

Для окончательного формирования целевой функции интеграл (2) дополняется ограничением в виде функции штрафа на допустимую величину показателя колебательности $M \leq M_{\partial on}$:

$$F = \begin{cases} I_{M,\lambda} \cdot \left\{ 1 + \left| M_{\partial on} - A_{3c}(\omega_p) \right| \right\}, & \text{если } A_{3c}(\omega_p) > M_{\partial on} ; \\ I_{M,\lambda}, & \text{если } A_{3c}(\omega_p) \leq M_{\partial on} , \end{cases} \quad (3)$$

где: $A_{3c}(\omega_p)$ – максимальное значение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) для замкнутого контура регулируемой величины $y(t)$ на резонансной частоте ω_p ; $M_{\partial on}$ – заданное значение показателя колебательности, определяющее допустимый запас устойчивости.

Определение параметров идентифицируемой модели и настроечных параметров регулятора в процессе адаптации базируется на численных методах с использованием авторской версии эволюционного алгоритма оптимизации “Optim-MGA” [2,3]. Принцип действия алгоритма изложен на авторском сайте в сети Интернет <http://ai.xss.ru> в разделе “Программные продукты”.

В качестве иллюстрационного примера приводятся процедуры идентификации объекта и оптимизации настроечных параметров регулятора в одноконтурной системе регулирования с ПИД-регулятором. Передаточная функция объекта регулирования, близкого по своим динамическим характеристикам к участкам регулирования температуры, где использование ПИД регулятора дает заметный эффект, выбрана в виде:

$$W_o(s) = K_o \cdot \frac{e^{-\tau_o \cdot s}}{(T_o \cdot s + 1)^n}, \quad (4)$$

где $K_o = 1 \text{ } ^\circ\text{C}/\%\text{УП}$ (УП – указатель положения регулирующего органа); $\tau_o = 20 \text{ с}$; $T_o = 100 \text{ с}$; $n = 3$.

Передаточная функция ПИД регулятора, учитывающая операцию реального дифференцирования, принята в виде:

$$W_p(s) = K_p + \frac{K_p}{T_u \cdot s} + \frac{K_p \cdot T_\delta \cdot s}{T_\phi \cdot s + 1}, \quad (5)$$

где K_p , T_u , T_δ – настроечные параметры ПИД регулятора (коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования), T_ϕ – постоянная времени включаемого в дифференциатор сглаживающего фильтра.

Как показали исследования, проведенные авторами, в большинстве случаев наиболее приемлемой оказывается аппроксимирующая модель в виде двух последовательно соединенных А-звеньев и звена транспортного запаздывания для объектов с самовыравниванием или в виде последовательно соединенных И-звена, А-звена и звена транспортного запаздывания для объектов без самовыравнивания. Такая аппроксимация позволяет снизить чувствительность по сравнению с настройками полученными по модели более высокого порядка.

С учетом отмеченного, передаточная функция аппроксимирующей модели для принятого объекта с самовыравниванием может быть записана в виде:

$$W_o^M(s) = K_o^M \cdot \frac{e^{-\tau_o^M \cdot s}}{(T_{o,1}^M \cdot s + 1) \cdot (T_{o,2}^M \cdot s + 1)}, \quad (6)$$

где K_o^M , τ_o^M ; $T_{o,1}^M$, $T_{o,2}^M$ – параметры идентифицируемой модели объекта регулирования.

Переходные процессы, полученные как на объекте $y_\partial(t)$ и на модели $y_M(t)$ при изменении задания на $5 \text{ } ^\circ\text{C}$ и для возмущения по каналу регулирующего органа $\lambda(t) = 10\% \text{ УП}$ показаны на рис.3,а,б. Настроечные параметры ПИД регулятора определялись исходя из принятого запаса устойчивости $M_{\partial on} \leq 1,55$.

Амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы $A_{zc}^M(\omega)$, подтверждающая соблюдение принятого условия, приведена на рис.3, в.

Предложенные авторами алгоритмы идентификации и последующей оптимизации настроечных параметров регулятора реализованы в виде универсальной программы “Tune P.I.D.” [4,5]. В промышленном исполнении программа “Tune P.I.D.” подключается к информационной подсистеме АСУТП либо через сервер архива, либо как удаленный OPC-

клиент и осуществляет автоматизированный прием исходной информации от различных АСР, входящих в АСУТП предприятия.

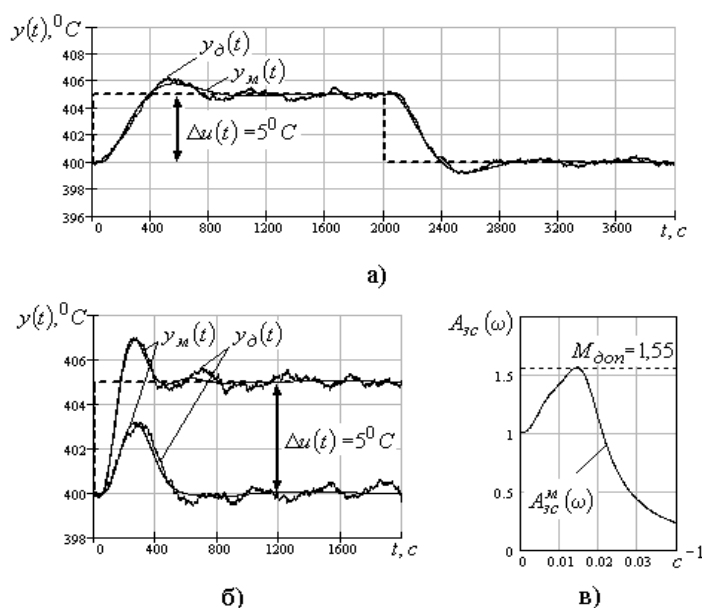


Рис.3.Идентификация системы регулирования (а), переходные процессы в реальной АСР и ее модели при оптимальных настроечных параметрах (б), АЧХ замкнутой оптимально настроенной системы (в)

Программа позволяет с заданной периодичностью, либо по команде инженера-наладчика изменять задание регуляторам, записывать выборки переходных процессов для идентификации объекта, после чего производить расчет оптимальных настроечных параметров регуляторов. Полученные настроечные параметры могут вводиться в контроллер либо автоматически, либо по согласованию с инженером-наладчиком.

Структурные схемы обмена данными программы «Tune P.I.D.» с АСУТП представлены на рис.4.

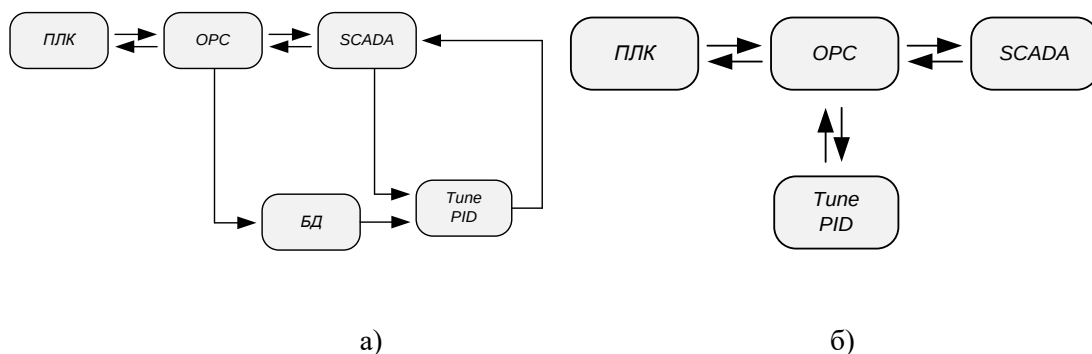


Рис. 4. Обмен данными программы «Tune P.I.D.» с АСУТП
а) через сервер технологической базы данных; б) как удаленный OPC-клиент.

При обмене информацией с АСУТП через базу данных, переменные программируемого логического контроллера (ПЛК) считываются сервером ввода/вывода OPC и поступают на АРМ оператора (SCADA) и одновременно в базу данных. Из базы данных формируются выборки переходных процессов. Затем, выборки из базы данных переводятся в текстовый файл и используются программой «Tune P.I.D.» для идентификации объекта и последующей

оптимизации настроечных параметров. Оптимальные настройки регулятора, полученные в программе «Tune P.I.D.», вводятся в окне настройки регулятора на SCADA-системе.

Для тестирования работы программы «Tune P.I.D.» использован ПТК для АСУТП ТЭЦ «ПОЛЮС» (Красноярский Край), разработанный ЗАО «Промэлектроника».

Основные алгоритмы работы, логические функции, выдача управляющих воздействий и первичная обработка информации реализуется на промышленных контроллерах Siemens и Beckhoff и SCADA/HMI системе InTouch компании Wonderware. Сервер ввода-вывода, система визуализации информации, ведение технологической базы данных, архив событий выполнены с использованием программных продуктов Wonderware.

Внешние сигналы от измерительных преобразователей поступают в контроллеры, где они преобразуются в числовые значения измеряемых величин и отображаются на мнемосхемах АСР.

Для тестирования работы программы «Tune P.I.D.» использован контур регулирования температуры перегретого пара котла KE25-39-400С.

Для получения выборки переходного процесса используется окно настройки регулятора в SCADA ТЭЦ «ПОЛЮС» (рис. 5,а).

Затем, полученная выборка переходного процесса, из базы данных в текстовом формате открывается в программе «Tune P.I.D.». Фрагмент текстового файла переходной характеристики представлен на рис. 5,б.

После открытия текстового файла переходного процесса, в программе «Tune P.I.D.» устанавливаются настроечные параметры процедуры идентификации и оптимизации.

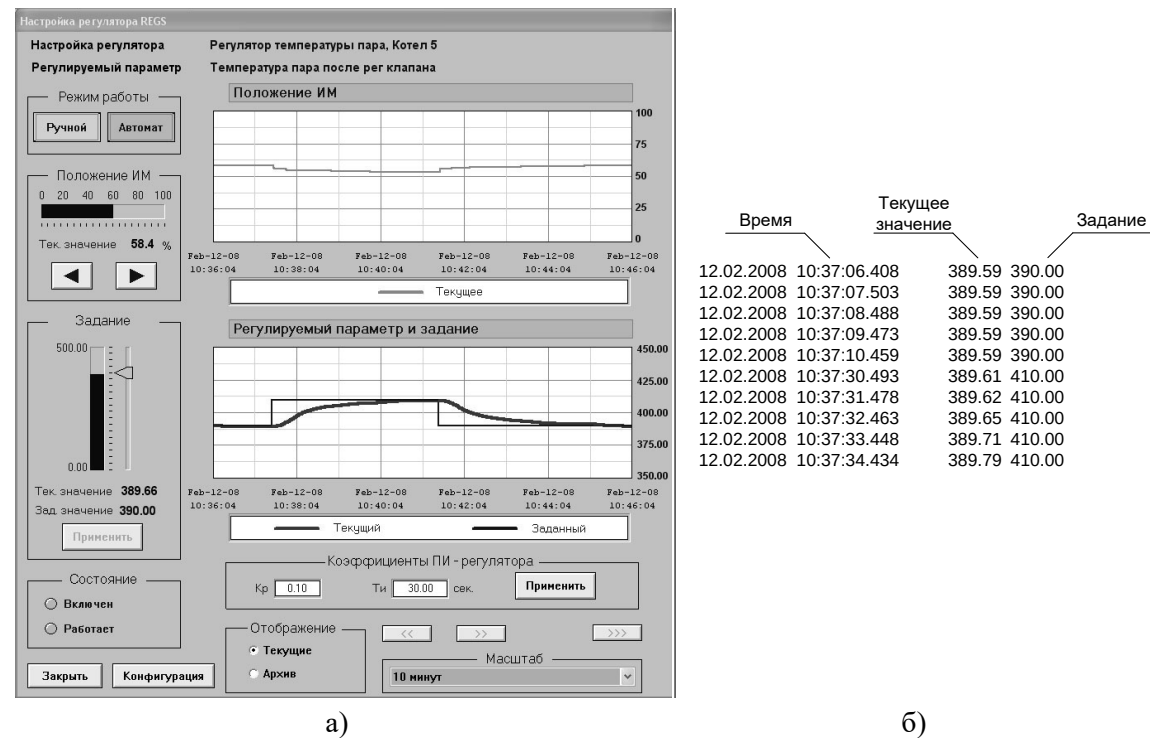


Рис. 5. Получение выборки переходного процесса

а) снятие переходного процесса; б) фрагмент текстового файла.

Окно программы «Tune P.I.D.» с открытым текстовым файлом переходного процесса и установленными параметрами настройки представлено на рис. 6.

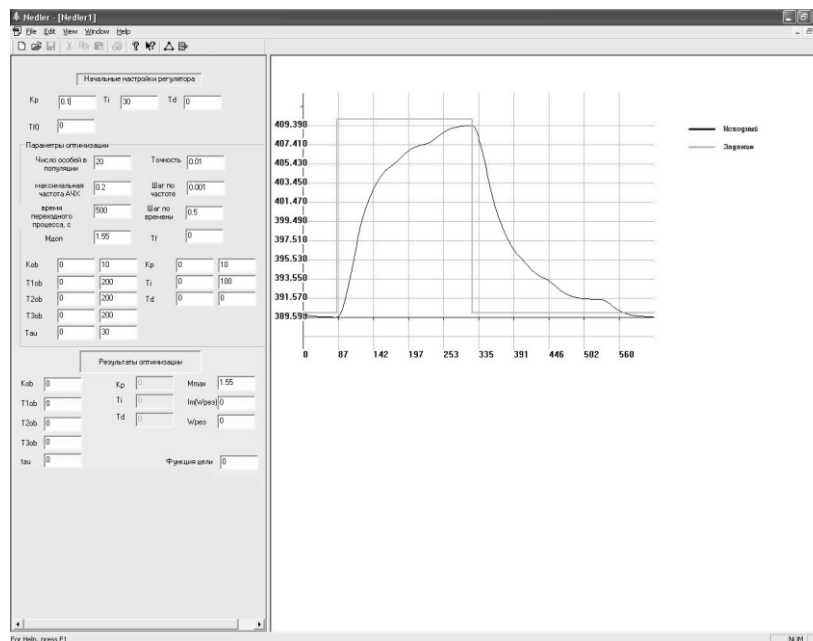


Рис. 6. Окно программы «Tune P.I.D.» с открытым текстовым файлом переходного процесса и установленными параметрами настройки

После ввода параметров настройки, проводится процедура идентификации и адаптации. Результаты расчета выводятся на экран в виде графиков и цифровых значений.

Окно программы «Tune P.I.D.» с результатами процедуры идентификации и адаптации показано на рис.7.

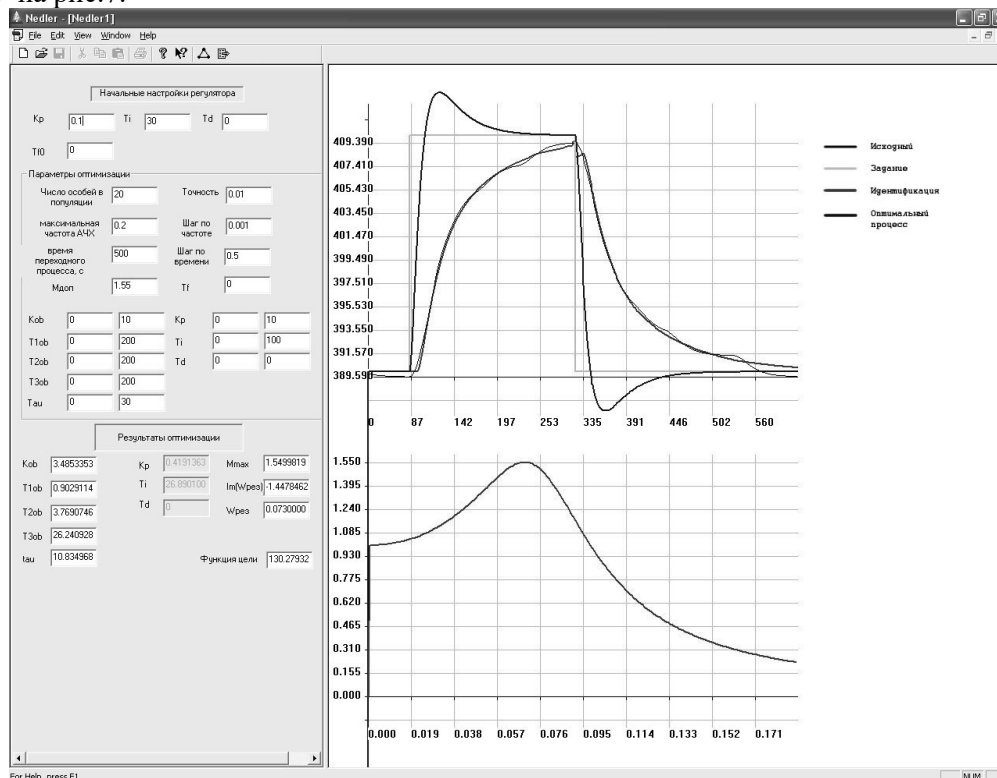


Рис.7. Окно программы «Tune P.I.D.» с результатами идентификации и адаптации.

Настройки регулятора, полученные в результате расчета в программе «Tune P.I.D.», устанавливаются, как новые настройки регулятора на SCADA ТЭЦ «ПОЛЮС». После этого

повторяется процесс получения графика переходного процесса, описанный выше. Процесс получения графика переходного процесса с рассчитанными настройками изображен на рис.7.

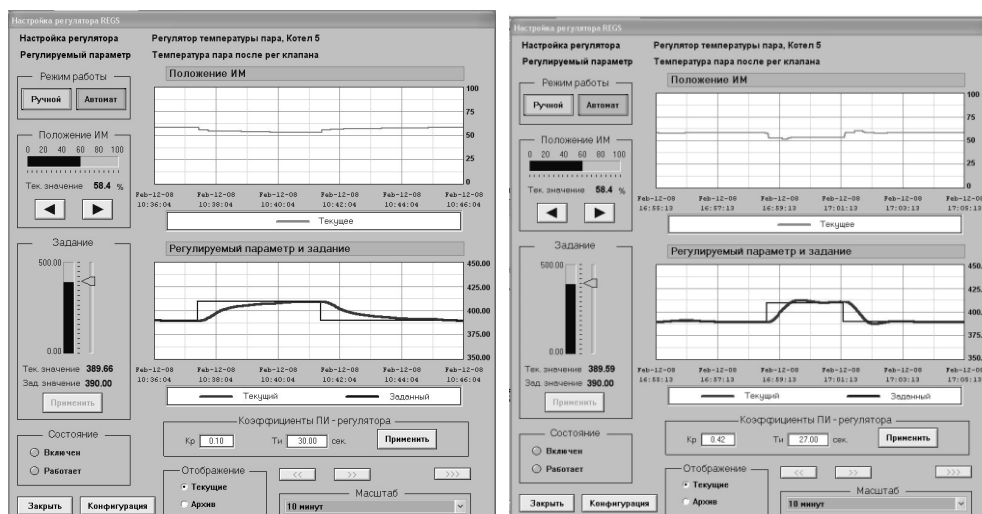


Рис.8. Переходный процесс с рассчитанными настройками

В заключение хотелось бы привести выдержку из работы [1].

“Как поведет себя адаптивный регулятор на конкретном процессе, в реальных промышленных условиях? Обеспечит ли он устойчивую работу, не появятся ли процессы блуждания при поиске параметров настройки? Справится ли регулятор с неизбежными сложными ситуациями? Причинами неудач могут быть порочная алгоритмическая схема, ошибки идентификации, неправильная логика коррекции параметров, сложившаяся неблагоприятная ситуация (динамика объекта и действующие возмущения) и т.д.”

Все эти вопросы, безусловно, требуют конкретных ответов на стадии технической реализации и внедрения в реальных промышленных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Соболев О.С.** О проблемах адаптивного регулирования промышленных процессов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 10.
2. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Параметрическая оптимизация и диагностика с использованием генетических алгоритмов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. № 12.
3. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3, 4.
4. **Репин А.И., Максимов А.Н., Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Бочкарева Е.Ю.** Идентификация и адаптация автоматических систем регулирования с использованием имитационных моделей // Иммитационное моделирование. Теория и практика. Сборник докладов третьей всероссийской научно-практической конференции ИММОД-2007. Санкт-Петербург. 2007. Том 2. С. 178-182.
5. **Репин А.И., Смирнов Н.И., Сабанин В.Р.** Идентификация и адаптация САР с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации // Промышленные АСУ и контроллеры. 2008. № 3.

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются наиболее применяемые в публикациях по синтезу систем автоматического управления технологическими процессами критерии оптимальности. Показана сомнительность практического использования обобщенных интегральных критериев, в которых удовлетворительное затухание колебаний процесса управления достигается с помощью функций штрафа. На достаточно представительном примере показывается целесообразность применения критерия реальной инвариантности (совпадающего с линейным интегральным критерием), позволяющим учитывать действие всех без исключения возмущений как детерминированных, так и случайных, в том числе недоступных для контроля.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМАЛЬНОСТИ

В настоящее время при выборе критерия оптимальности системы автоматического управления (САУ) в подавляющем числе случаев ориентируются на качество процесса изменения управляемой величины, вызванного возмущением ступенчатой формы. Поскольку на реальные объекты могут действовать по каналам с различной динамикой, предварительно предполагается выбор наиболее предпочтительного из них.

Конкретно качество процесса определяется значениями некоторого числа показателей качества, в число которых обычно входят максимальное отклонение в статике и динамике, его длительность, а также интенсивность затухания колебаний. Максимальное отклонение и длительность процесса объединяются в один интегральный показатель, который в геометрической интерпретации точно или приближенно характеризует площадь под графиком изменения управляемой величины. Поскольку процесс этого изменения может быть колебательным, интеграл берется не от самой управляемой величины, а от ее модуля (модульный интегральный показатель), либо управляемая величина предварительно возводится в квадрат (квадратичный интегральный показатель). Учет же показателя интенсивности затухания колебаний производится различными способами. Наиболее распространенными в публикациях по теории автоматического управления технологическими процессами способами являются два:

- 1) введение показателя интенсивности затухания колебаний в виде функции штрафа в соответствующим образом сконструированный обобщенный интегральный показатель;
- 2) введение требования должного запаса устойчивости системы в явном виде, как ограничения на обычный интегральный показатель.

В первом случае задача рассматривается как многокритериальная. Формирование обобщенных

показателей производится известными из теории математического программирования методами многокритериальной оптимизации, для чего чаще всего используется принцип свертки [1]. В соответствии с этим принципом обобщенный критерий представляет собой взвешенную сумму частных критериев. В большинстве публикаций ухудшение затухания колебаний связывается с ростом интеграла квадрата управляющего воздействия, так что обобщенный интегральный критерий принимает вид [2]:

$$I_{\text{общ}} = \int_0^{\infty} [y^2(t) + e^2 \mu^2(t)] dt. \quad (1)$$

Функция под интегралом, зависящая от управляющего воздействия $\mu(t)$, является функцией штрафа, а число e характеризует ее «вес». Критерием оптимальности является минимум этого показателя при заданном «весе» штрафа, конкретное значение которого определяется подбором исходя из удовлетворительного затухания процесса изменения управляемой величины. Встречаются и другие способы формирования обобщенного критерия, например, введением в интеграл (1) производных от управляемой величины [3], оценки степени затухания процесса и т. п.

Вычисление процесса управления в одноконтурной системе производится по передаточной функции, связывающей изображение управляемой величины с изображением возмущения:

$$Y(s) = \Phi_{y\lambda}(s) \Lambda(s), \quad (2)$$

$$\text{где} \quad \Phi_{y\lambda}(s) = \frac{W_{y\lambda}(s)}{1 + W(s)}, \quad (3)$$

$$W(s) = R(s) W_{y\mu}(s), \quad (4)$$

$W_{y\lambda}(s), W_{y\mu}(s), R(s), W(s)$ — передаточные функции объекта по каналу действия на управляемую величину $y(t)$ возмущения $\lambda(t)$, объекта по каналу действия на управляемую величину управляющего воздействия $\mu(t)$, регулятора, разомкнутого контура.

Подобным же образом определяются изображение управляющего воздействия $\mu(t)$.

Поведение объектов без запаздывания, которые описываются обыкновенными дифференциальными уравнениями, может также рассматриваться в пространстве переменных состояния x . В этом случае обобщенный интегральный критерий записывается в виде [4]:

$$I = \int_0^{\infty} (x^T F x + \mu^T E \mu) dt, \quad (5)$$

где F и E — матрицы коэффициентов веса.

Определение параметров настройки регулятора из условия минимизации этого выражения выполняется методом, получившим название аналитического конструирования регуляторов.

Аналогично формулируется критерий оптимальности, если определяющим является средне-квадратическое отклонение (СКО) управляемой величины, только квадраты переменных заменяются их дисперсиями.

Второй способ оценки колебательности процесса управления, предложенный профессором кафедры АСУ ТП МЭИ Е.Г. Дудниковым [5], состоит в наложении ограничения на расположение корней характеристического уравнения системы. Рабочим инструментом достижения этой цели служит аппарат расширенных частотных характеристик и соответствующим образом модифицированный критерий Найквиста. Расчет начинается с построения границы области требуемого затухания процесса управления в пространстве параметров настройки регулятора из условия прохождения расширенной комплексной частотной характеристики разомкнутого контура $W(-m\omega + j\omega)$ (m — степень колебательности процесса) через точку $(-1, j0)$. Подобным образом обеспечение требуемого затухания процесса управления решает эту задачу не только по отношению к процессу относительно рассматриваемого возмущения, но также к процессу, вызванному любым возмущением, и, в сущности, является ограничением на запас устойчивости системы.

После этого в найденной области ищется минимум обычных интегральных критериев, для чего необходимо располагать, помимо передаточной функции объекта по управляющему каналу, также передаточной функцией по каналу действия выбранного возмущения. Исключение составляет линейный интегральный критерий, который можно применять при достаточно сильном затухании процесса (при достаточно большом значении m):

$$I_{\text{лин}} = \int_0^{\infty} y(t) dt. \quad (6)$$

Для системы с ПИД регулятором, передаточная функция которого определяется формулой

$$R(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (7)$$

(где k_p, T_i, T_d — коэффициент передачи, постоянные времени интегрирования и дифференцирования), минимум этого критерия имеет место при максимуме отношения

$$k_p/T_i \rightarrow \max, \quad (8)$$

так что при оптимизации настройки в этом случае можно ограничиться только одной КЧХ объекта по управляющему каналу.

Вместо ограничения на расположение корней, можно ввести ограничение на расположение комплексной частотной характеристики (КЧХ) разомкнутого контура системы $W(j\omega) = R(j\omega)W_{\text{об}}(j\omega)$

[7, 8]: она не должна заходить внутрь окружности радиуса $r = A_{\text{max}} / (A_{\text{max}}^2 - 1)$, центр которой расположен на отрицательной вещественной полуоси на расстоянии $u = r A_{\text{max}}$ от начала координат. «Опасная» с точки зрения критерия устойчивости Найквиста точка $(-1, j0)$ расположена внутри этой окружности, так что выполнение указанного требования может рассматриваться по-прежнему как обеспечение требуемого запаса устойчивости системы.

Передаточная функция замкнутого контура системы определяется формулой

$$\Phi_{\text{yx}}(s) = \frac{W(s)}{1 + W(s)}, \quad (9)$$

и если КЧХ разомкнутого контура касается окружности с индексом M , то модуль КЧХ замкнутого контура системы при обычно встречающемся виде КЧХ объектов управления имеет резонансный пик A_{max} при частоте касания ω_{res} . Поэтому колебательность процесса может быть также охарактеризована относительным значением резонансного пика (частотным показателем колебательности):

$$M = \frac{A_{\text{max}}}{A_0}, \quad (10)$$

где A_0 — значение модуля КЧХ при нулевой частоте (в системах с интегралом в законе управления оно равно единице).

Судя по публикациям, оба подхода к формулировке критериев (обобщенным интегральным с ограничением на колебательность процесса в виде функции штрафа и обычным интегральным с явным ограничением на запас устойчивости) считаются равноценными, и выбор между ними определяется лишь теми или иными вычислительными соображениями или даже привычкой. Однако между ними существует кардинальное различие.

Оптимизация по обобщенным интегральным критериям предполагает рассмотрение проблемы качества только с точки зрения вида процесса управления при выбранном воздействии без учета специфики САУ как замкнутых систем с обратными связями, способными породить собственные колебания вне зависимости от наличия заметных внешних воздействий. Для другого входного воздействия, входящего в другую точку объекта процесс управления окажется иным, а следовательно, иным окажется и затухание колебаний.

Как легко видеть, однозначной связи между определением колебательности по обобщенному интегральному показателю качества и расположением корней характеристического уравнения системы не существует, поскольку учитываемый в нем процесс управления определяется не только корнями (полюсами передаточной функции), но и ее нулями. Не существует в этом случае и связи с запасом устойчивости, определяемым по КЧХ разомкнутого контура, так как эта реакция зависит не только

от КЧХ разомкнутого контура, но и от КЧХ объекта по каналу действия возмущения.

Наглядное представление о необходимости явно учитывать при формулировке критерия оптимальности запас устойчивости дает обращение к фундаментальному принципу кибернетики, устанавливающим общность и единство процессов управления и связи в машинах и организмах (именно так понимал Н. Винер главное назначение этой в то время новой науки). В [6] приводится подробное описание медицинских экспериментов, показавших, что наиболее распространенные формы психических заболеваний человека связаны с нарушением нормальной деятельности в мозге обратных связей. Соответственно, психическому здоровью человека соответствует в области САУ достаточно большой запас устойчивости их замкнутых контуров.

Вспомним, например, как решается задача допуска к управлению каким-либо механизмом, например автомобилем, человека. Для получения водительских прав ему необходимо предъявить два документа: во-первых, справку из медучреждения о психическом здоровье и, во-вторых, справку о сдаче экзамена по практическому вождению. Этому требованию в области САУ соответствует критерий оптимальности, которые состоят из двух составляющих: требованию к запасу устойчивости и требованию к точности управления при заданных воздействиях. Расчету САУ на обобщенный критерий качества (1) соответствовало бы оформление водительского удостоверения без медицинской справки, только на основе успешной сдачи экзамена по вождению. О психическом здоровье претендента предполагалось бы судить по его поведению при сдаче экзамена по вождению. Нетрудно представить себе последствия: за рулем наверняка оказались бы психически неуравновешенные субъекты. Подобно тому, как во время испытательной поездки при сдаче практики вождения могут не встретиться ситуации, при которых испытуемый не смог справиться с управлением, при синтезе САУ на заданное, считающееся типовым, воздействие нет уверенности, что в дальнейшем в процессе эксплуатации системы не возникнут другие воздействия или шумы, которые вызовут недопустимо большую колебательность процессов управления.

Таким образом, при синтезе САУ технологическими процессами обобщенными интегральными критериями, строго говоря, не следовало бы пользоваться в принципе.

ПРИМЕНЕНИЕ КРИТЕРИЕВ ТЕОРИИ ИНВARIANTНОСТИ

Ориентировка на возмущения ступенчатой формы может быть допущена, если рассматривать их не как типовые, а как наиболее тяжелые, вызывающие наибольшее отклонение управляемой величины. Остается, однако, проблема оптимизации нормальных условий работы САУ, когда она находится под воздействием случайных стационарных возмущений и интерес представляет не только вы-

бросы управляемой величины, вызванные ступенчатым изменением возмущений, но и среднее за длительное время отклонение управляемой величины. Методология оптимизации по критерию минимума дисперсии была предложена уже в первых работах по теории сервомеханизмов [7], однако в практике автоматизации технологических процессов сколь угодно заметного применения не получила (если не считать нескольких диссертаций). По-видимому, связано это с необходимостью располагать корреляционными функциями возмущений, для оценки которых с требуемой точностью необходимы неприемлемо длительные их реализации (как показывают примеры расчетов типичных объектов — порядка месяца [9]) при условии, что все это время объект будет оставаться в обычном стационарном режиме функционирования. По очевидным причинам не могут быть получены оценки корреляционных функций недоступных для контроля возмущений, наличие которых является одной из особенностей промышленных объектов управления.

В этой связи уместно обратиться к предложенному в [8] показателю, который может рассматриваться как принадлежащий к показателям теории инвариантности, характерной особенностью которой является отсутствие необходимости в знании характеристик возмущений. Оптимизация начинается с формулировки условий абсолютной инвариантности, при выполнении которых отклонение управляемой величины полностью устраняется. Если абсолютная инвариантность оказывается реально недостижимой, приходится уходить от идеальных характеристик системы, упрощая их на основании тех или иных эвристических соображений. Естественно, это приводит к появлению отклонений управляемой величины, поэтому получаемые таким образом системы именуются как системы, «инвариантных до ε » (так на структурных схемах обычно обозначается ошибка управления) [10].

При использовании для синтеза САУ частотных методов, требование абсолютной инвариантности сводится к требованию равенства нулю соответствующих частотных характеристик на всем диапазоне частот от $\omega = 0$ до $\omega = \infty$. Из (3)—(4) следует, что выполнение этого требования возможно только при бесконечно большом усилении в регуляторе, что входит в противоречие с устойчивостью контура. Известно, однако, что вне зависимости от физической природы реальных возмущений (случайных или детерминированных, в том числе ступенчатой формы), их наибольшая интенсивность сосредоточена в низкочастотной области. Это обстоятельство позволяет представить передаточную функцию системы в окрестности нулевой частоты рядом Тейлора и для достижения абсолютной инвариантности потребовать равенства нулю его коэффициентов. Если же ограничиться инвариантностью «до ε », можно рассматривать только два первых члена разложения [8, 9]:

$$\Phi_{y\lambda}(s) \approx C_0 + C_1 s, \quad (11)$$

$$\text{где } C_0 = [\Phi_{y\lambda}(s)]_{s=0}, \quad C_1 = \left[\frac{d}{ds} \Phi_{y\lambda}(s) \right]_{s=0} \quad (12)$$

и не требовать равенства нулю этих коэффициентов, а требовать только их минимума.

Выражение для $\Phi_{y\lambda}(s)$ системы с интегралом в алгоритме функционирования регулятора можно записать следующим образом:

$$\Phi_{y\lambda}(s) \approx s \Phi_{y\lambda}^0(s)$$

Следовательно, $C_0 = 0$ и оптимизация настройки регулятора сводится к минимизации коэффициента C_1 , который может быть вычислен по формуле:

$$C_1 = \left[\frac{d}{ds} \Phi_{y\lambda}^0(s) s \right]_{s=0},$$

или, применяя правило дифференцирования произведения двух функций:

$$\begin{aligned} C_1 &= \left[s \frac{d}{ds} \Phi_{y\lambda}^0(s) + \Phi_{y\lambda}^0(s) \right]_{s=0} = \\ &= [\Phi_{y\lambda}^0(s)]_{s=0} = \left[\frac{\Phi_{y\lambda}(s)}{s} \right]_{s=0}. \end{aligned} \quad (13)$$

В соответствии с известными правилами операционного исчисления, эта формула во временной области определяет конечное значение интеграла от переходной характеристики системы, т. е. значение линейного интегрального критерия (6). В частности, для системы с ПИД регулятором формула (13) приводит к выражению, совпадающему с линейным интегральным критерием оптимальности (8).

Полученный критерий остается неизменным для любого из возмущений, т.е. его применение минимизирует как СКО управляемой величины, так и линейный интегральный критерий по отношению ко всем возмущениям, как доступным, так и недоступным для контроля. Такого рода инвариантность называется полиинвариантностью. Следовательно, можно утверждать, что формулой (13), определяется достаточно универсальный и к тому же очень простой для расчетов критерий оптимальности, не требующий знания корреляционных функций возмущений. Применение рассматриваемого критерия оптимизирует также настройку при изменении задания регулятору.

Важное сомнение относительно практического применения критерия (13) касается правомерности считать входные воздействия системы автоматического управления низкочастотными, т.е. не является ли условие низкочастотности воздействий уникальным, не характерным для реальных САУ. Спорным остается вопрос об ориентировке на линейный интегральный критерий — во всех публикациях по теории автоматического управления применяется квадратичный или модульный критерий.

Ответ на эти вопросы может быть получен лишь расчетами достаточно представительных примеров. При их выполнении полезно учитывать, что

практика обычно требует, чтобы значение ошибки управления в САУ σ_y , отнесенное к отклонению управляемой величины при отсутствии управления σ_v , было бы достаточно малым. Это соображение и целесообразно положить в основу определения понятия «низкочастотное воздействие», т. е. считать возмущение низкочастотным, если его действие вызывает достаточно малую относительную среднеквадратичную ошибку.

Пример. Передаточная функция управляющего канала объекта — пароперегревателя котла электростанции определяется формулой:

$$W_\mu(s) = \frac{0,45 \exp(-0,52 s)}{(0,9 s + 1)^3}.$$

Граница области запаса устойчивости по $m = 0,366$ для системы с ПИ регулятором в координатах «частота ω — коэффициент веса при интегральной составляющей регулятора k_p/T_i » показана на рис.

1. Оптимум настройки регулятора при ограничении на m по линейному интегральному критерию находится в вершине этого графика и оказался следующим: $k_p = 1,84$; $T_i = 3,02$; на рис. 1 соответствующая точка обозначена цифрой 1. Оптимум настройки по квадратичному интегральному критерию $k_p = 2,5$; $T_i = 4,84$ обозначен цифрой 2.

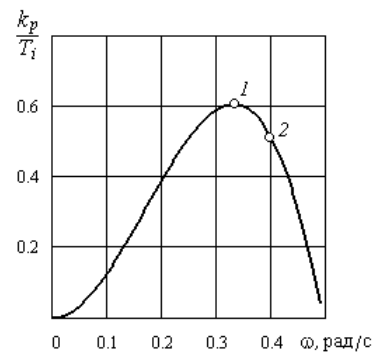


Рис. 1. Граница области запаса устойчивости системы с ПИ регулятором

1 — для линейного критерия; 2 — для квадратичного критерия

На рис. 2 показаны графики процессов управления при ступенчатом возмущении со стороны регулирующего органа для обоих критериев. Циф-

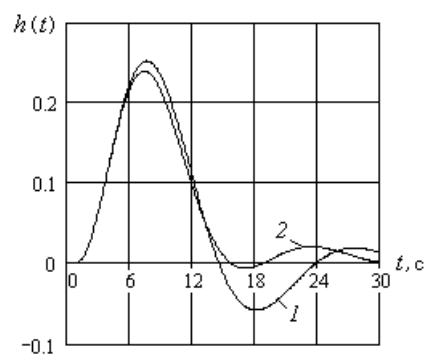


Рис. 2. Процессы управления при ступенчатом возмущении со стороны регулирующего органа

1 — для линейного критерия; 2 — для квадратичного критерия
рой 1 обозначен процесс с линейным критерием, цифрой 2 — процесс с квадратичным критерием. Очевидно, что с точки зрения величины перерегулирования предпочтение следует отдать квадратичному критерию.

Потребуем теперь, чтобы СКО управления САУ, отнесенное к отклонению управляемой величины при отсутствии управления σ_y/σ_v , было достаточно малым, например, равным 0,05. Будем полагать, что корреляционная функция приведенного к выходу объекта возмущения $v(t)$, эквивалентного действию всех возмущений, отнесется к числу типичных, допускающую аппроксимацию выражением [11]:

$$r_v(\tau) = d_v \left[\frac{4}{3} \exp(-\alpha|\tau|) - \frac{1}{3} \exp(-4\alpha|\tau|) \right].$$

Для того, чтобы была получена указанная точность управления при настройке по линейному критерию, параметр α должен иметь значение 0,007.

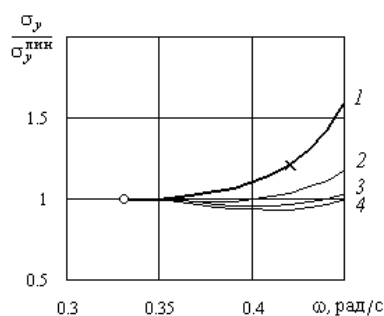


Рис. 3. Графики изменения относительной среднеквадратичной ошибки

1 — $(\sigma_y/\sigma_v) = 0,05$; 2 — $(\sigma_y/\sigma_v) = 0,1$;

3 — $(\sigma_y/\sigma_v) = 0,2$; 4 — $(\sigma_y/\sigma_v) = 0,3$

График изменения СКО, отнесенного к ее значению при оптимальной настройке по линейному критерию $\sigma_y/\sigma_y^{\text{лин}}$, при движении вправо от точки максимума вдоль границы области запаса устойчивости приведен на рис. 3 (кривая 1). Как видим, СКО при этом монотонно возрастает, т. е. настройка по линейному критерию (обозначена кружком) является оптимальной. Здесь же крестиком обозначена точка, соответствующая настройке по квадратичному критерию; СКО при этом оказалась в 1,2 раза больше, чем при настройке по линейному критерию. На рис. 3 показаны, кроме того, графики для относительной СКО $\sigma_y/\sigma_v = 0,1$; 0,2 и 0,3 (кривые 2, 3, 4); такие значения СКО, по-видимому, охватывают весь диапазон возможных требований к точности работы САУ. Рассмотрение графиков позволяет сделать вывод, что настройка по линейному интегральному критерию дает результат, достаточно

близкий к оптимуму, даже при маловероятно большой величине СКО, составляющей 0,3 от ее значения при отсутствии всякого управления. Следовательно, все возмущения могут рассматриваться как низкочастотные. Нескольким неожиданным оказывается ответ на вопрос о применимости квадратичного интегрального критерия. Заметного увеличения точности управления по СКО он не дает; напротив, после перехода от линейного критерия к квадратичному возникает опасность значительного ее увеличения, если окажется, что возмущения занимают достаточно узкую полосу частот.

Рассмотренный пример подтверждает целесообразность использования критерия инвариантности «до ε » (иначе говоря — линейного интегрального критерия) при синтезе САУ, по крайней мере, на этапе ее проектирования. Окончательное решение должно быть отнесено на стадию ввода САУ в эксплуатацию, когда применение статистических методов оценки свойств возмущений значительно упрощается (поскольку, например, центрирование реализаций осуществляется самой системой). В этой связи следует иметь в виду, что синтез САУ должен быть продолжен на стадии ее ввода в эксплуатацию с помощью алгоритмов адаптации и по другой причине — исходя из требований к надежности оценки модели объекта управления [9].

В заключение, следует отметить целесообразность проведения обследования реально работающих САУ с точки зрения допустимого отклонения их управляемых величин, сравнительно с отклонениями, которые возникли бы при отсутствии всякого управления (в том числе и ручного). Это позволит, более обоснованно подойти к выбору критериев оптимальности при проектировании САУ, которые в настоящее время, как правило, проектируются вообще без какого-либо учета случайного характера возмущений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Математический** энциклопедический словарь / Под ред. Ю.В. Прохорова. М: Советская Энциклопедия, 1988.
2. **Цыпкин Я. З.** Основы теории автоматических систем. М: Наука, 1977.
3. **Фельдбаум А.А.** Электрические системы автоматического регулирования. М: Издательство оборонной промышленности, 1954.
4. **Рей У.** Методы управления технологическими процессами. М: Мир, 1983.
5. **Дудников Е. Г.** Основы автоматического регулирования тепловых процессов. М: Госэнергоиздат, 1954.
6. **Винер Н.** Кибернетика, или управление и связь в животном и машине. М: Советское радио, 1958.
7. **Теория** следящих систем / Под ред. Х. Джеймса, Н. Николса, Р. Филиппса. М: Иностранная литература, 1953.
8. **Ротач В.Я.** Расчет настройки промышленных систем регулирования. Госэнергоиздат, 1961.
9. **Ротач В. Я.** Теория автоматического управления. М: Издательский дом МЭИ, 2007.
10. **Петров Б.Н., Солодовников В.В., Топчеев Ю.И.** Современные методы проектирования систем автоматического управления. М.: Машиностроение. 1967.

11. **Ицкович Э.Л.** Статистические методы при автоматизации производств. М.: Энергия. 1964.

Е.Ю. Бочкарева, А.Н. Фейгина, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов
Московский энергетический институт (технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ

АННОТАЦИЯ

Рассматриваются методические приемы анализа автоматических систем автоматического управления, содержащих типичные нелинейности в структурах управляющих устройств. В основе предлагаемого математического аппарата лежит имитационное моделирование линейных и нелинейных элементов в сочетании с численными способами оптимизации. В качестве примера проведен анализ двухконтурной системы управления нагрузкой энергоблока с реальной моделью стабилизирующего регулятора топлива и корректирующего регулятора мощности, в состав которых были включены все элементы, присущие реальным регуляторам.

В настоящее время задачи повышения качества управления и регулирования технологическими процессами, как правило, решаются в частотной области с использованием линейных моделей систем. Однако, широко применяемые в энергетике и промышленности регулирующие устройства с электрическими исполнительными механизмами постоянной скорости (нелинейные релейно-импульсные регуляторы) требуют иного подхода к их исследованию и совершенствованию. Такие регуляторы содержат в своей структуре нелинейные элементы, параметры которых, наряду с основными настроечными параметрами функционального блока, оказывают существенное влияние на качество работы систем управления. С учетом изложенного, одним из прогрессивных направлений исследования систем управления с нелинейными элементами становится имитационное моделирование во временной области.

В работе была поставлена задача создания имитационной модели двухконтурной автоматической системы регулирования как в линейном, так и в нелинейном исполнении с целью исследования ее поведения в замкнутом состоянии. Для имитации работы линейной модели использовались рекуррентные выражения элементарных динамических звеньев. Нелинейные модели регуляторов, в том числе непосредственно воздействующих на дроссельные регулирующие органы, реализованы также с помощью рекуррентных выражений, имитирующих работу широтно-импульсного модулятора (ШИМ), электрического исполнительного механизма с постоянной скоростью (ИМ), узла нечувствительности, люфта в соединении исполнительного механизма с регулирующим органом, а также учтены ограничения на диапазоны изменения корректирующего и стабилизирующего регулирующих воздействий [1].

Необходимость разработки такой имитационной модели обусловлена изучением степени влияния нелинейностей на качество работы замкнутой автоматической системы регулирования для сравнения с результатами, полученными по линейной модели. Сравнение проводилось по критерию в виде интеграла по модулю отклонения регулируемого параметра от заданного значения, который и использовался в качестве целевой функции для оптимальной настройки системы, а также по числу импульсов широтно-импульсного модулятора (ШИМ) на интервале времени переходного процесса для нелинейного регулятора. В предлагаемой работе для оптимальной настройки исследуемых структур использовалась авторская версия эволюционного алгоритма оптимизации "Optim-MGA" [2,3]. Результаты расчета в приведенных ниже примерах получены с применением пользовательской программы "Optim-MGA" для математического пакета MathCad [4].

За основу математического описания объекта регулирования была принята упрощенная модель энергоблока по каналу регулирования электрической мощности, взятая из работы [5]. Фактически рассматривалась система регулирования нагрузки энергоблока при отключенном турбинном регуляторе мощности (ТРМ) (имитация работы блока в скользящем режиме). В принятой авторами двухконтурной АСР не учитывалось также влияние на ее работу двухконтурной системы регули-

К особенностям исследуемой структуры следует отнести малоинерционный внутренний контур и накладываемые достаточно жесткие ограничения на диапазон изменения промежуточной регулируемой величины, которой является расход газа G_g . Если для линейной системы такая схема не вызывает особых затруднений в исследованиях, то для систем, содержащих нелинейности, включая электрический исполнительный механизм с постоянной скоростью, является проблематичной.

Block diagram of a two-stage control system:

- The reference signal $N_{зд}$ is compared with the system output N at a summing junction.
- The error signal is processed by the first PI-controller (КРМ).
- The output of the first controller is compared with the output of the second PI-controller (РТ) at another summing junction.
- The output of the second controller drives the plant, represented by a block with transfer functions $W_{об}$ and $W_{об1}$.
- The plant output N is fed back to the first summing junction.
- A feedforward path G_r branches off from the output of the second stage and is added to the error signal at the first summing junction.

Регулирование мощности $N(t)$ осуществляется изменением расхода топлива G_c . Динамика объекта, как отмечалось выше, представлена передаточными функциями, взятыми из работы [5]:

Имитационная модель исследуемой системы реализована в программной среде MathCad с использованием рекуррентных выражений линейных и нелинейные элементов, описание которых приведено в [1].

[illegible]

Оптимальные настройки регуляторов определялись численным методом с использованием модифицированного генетического алгоритма «Optim-MGA». Для оптимизации была сформирована целевая функция, описываемая выражением вида:

$$F(x_i) = a_1 \cdot I_{\text{mod}}(x_i) + a_2 \cdot Ch(x_i) + a_3 \cdot \sum_{j=1}^2 (A_{3c}(x_i) \leq 1,62), \quad (2)$$

где a_n – нормы штрафа; $I_{\text{mod}}(x_i)$ – интеграл по модулю, вычисляемый из выражения

$$I_{\text{mod}}(x_i) = \sum_{j=0}^N |u - y_j(x_i)|; x_i - \text{вектор параметров регуляторов, } x_i = \{k_{\text{п, кор}}, k_{\text{и, кор}}, k_{\text{п, ст}}, k_{\text{и, ст}}\}; N$$

– число точек переходного процесса; $Ch(x_i)$ – число включений ИМ; $\sum_{j=1}^2 (A_{3c}(x_i) \leq 1,62)$ – штраф

на превышение максимума АЧХ замкнутой АСР по внешнему и внутреннему контурам.

Параметры нелинейных элементов были выбраны средними из рекомендуемых диапазонов. Результаты оптимизации регуляторов при возмущении по каналу задания $u(t)=1$ приведены в таблице.

Таблица.

Параметры	Идеальная линейная система	Реальная линейная система	Нелинейная система
$k_{\text{п, кор}}$	52,741	52,741	52,741
$k_{\text{и, кор}}$	0,142 1/с	0,142 1/с	0,142 1/с
$k_{\text{п, ст}}$	3,439	3,439	3,439
$k_{\text{и, ст}}$	3,573 1/с	0	0
Тимп ШИМ	-	-	1 сек
Зона нечувствительности	-	-	5 %
Скорость ИМ	-	-	100 сек/об
Люфт	-	-	0 %
Интеграл по модулю	17,6	22,2	48,8

Настраивались идеальная линейная и нелинейная системы. Это обеспечило удовлетворительные колебания расхода газа при изменении мощности энергоблока. Работа линейной системы было также проанализирована при настройках, полученных для нелинейной системы. Настроечные параметры, полученные для нелинейной системы, оказались более грубыми при их установке в линейной структуре, о чем достаточно наглядно свидетельствует существенное снижение резонансной частоты внутреннего контура (рис.3).

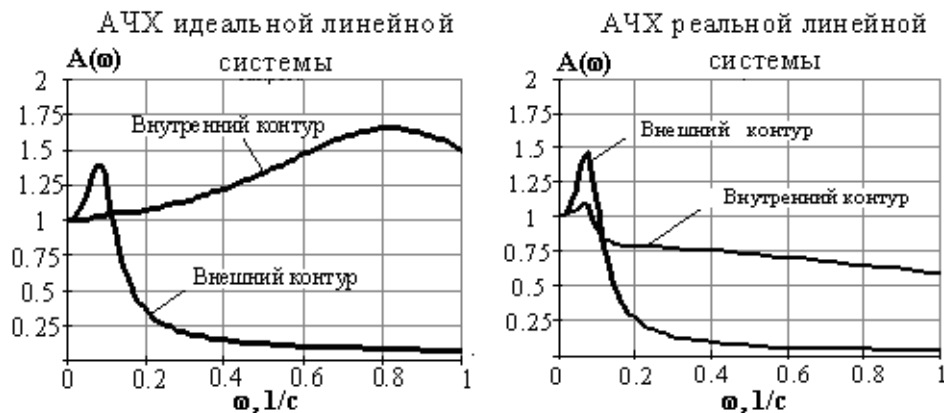


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики линейной системы

. Из переходного процесса для идеальной линейной системы (рис.4) видно, что при найденных настройках происходит мгновенное открытие до максимальной величины регулирующего органа во внутреннем контуре, что недопустимо, так как он управляет расходом газа. В нелинейной системе исполнительный механизм не допустил резкого изменения расхода газа, что проявилось в

настройках стабилизирующего регулятора, который в результате проведенной процедуры оптимизации фактически превратился в пропорциональный П-регулятор.

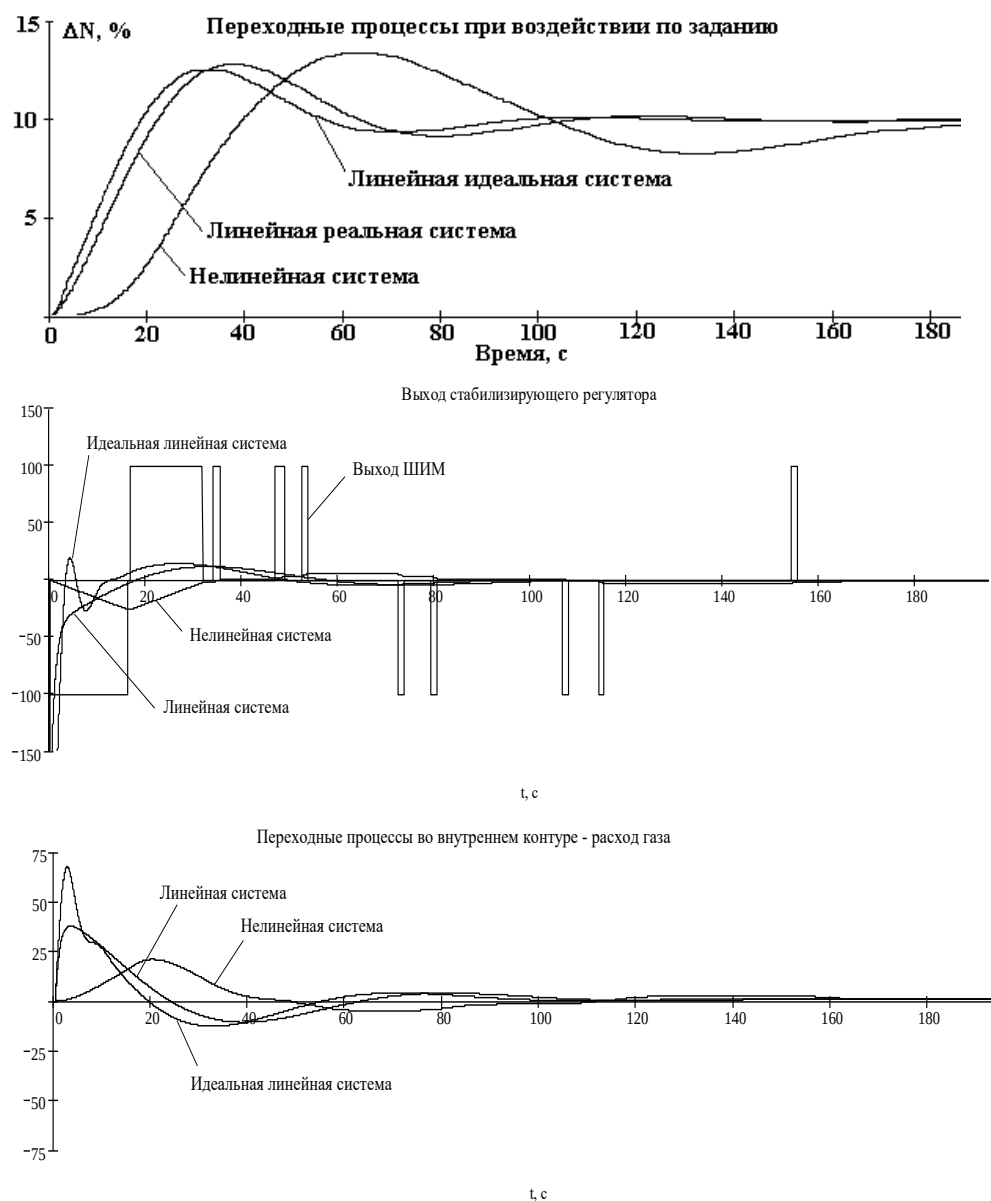


Рис. 4. Переходные процессы

На исследуемой модели системы регулирования с оптимальными параметрами $k_{П,кор}$, $k_{И,кор}$, $k_{П,ст}$, $k_{И,ст}$ в работе были исследованы зависимости выбранных показателей качества от параметров нелинейных элементов. Для этого в приемлемых диапазонах варьировался один из параметров и снимался переходный процесс на интервале в 500 секунд. Оценка качества работы системы определялась из выражения (2). На рис. 5 графически представлены результаты исследования. Из рис. 5 видно, что длительность импульса ШИМ и скорость исполнительного механизма имеют минимум в исследованном диапазоне. Увеличение же величины зоны нечувствительности и люфта однозначно приводят к увеличению интеграла по модулю, но в то же время уменьшение зоны нечувствительности значительно повышает количество включений исполнительного механизма.

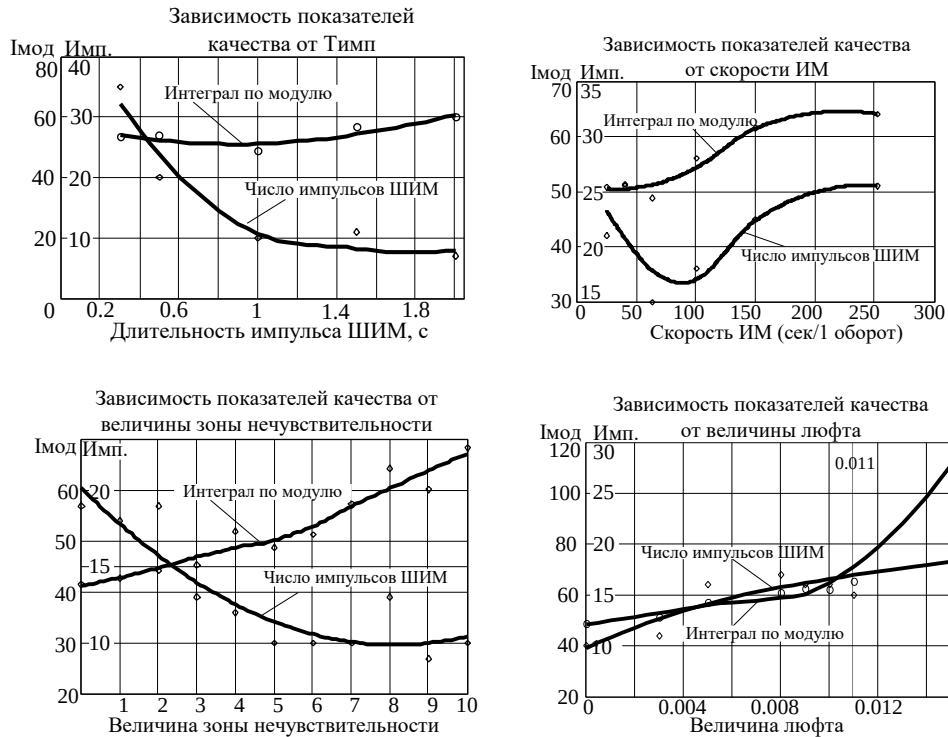


Рис. 5. Зависимость качества работы АСР от параметров нелинейных элементов

При неизменных параметрах нелинейных элементов в стабилизирующем регуляторе модель системы была протестирована при вариациях величины возмущения по каналу управления от 2,5 до 30% мощности. Результаты показаны на рис. 6.

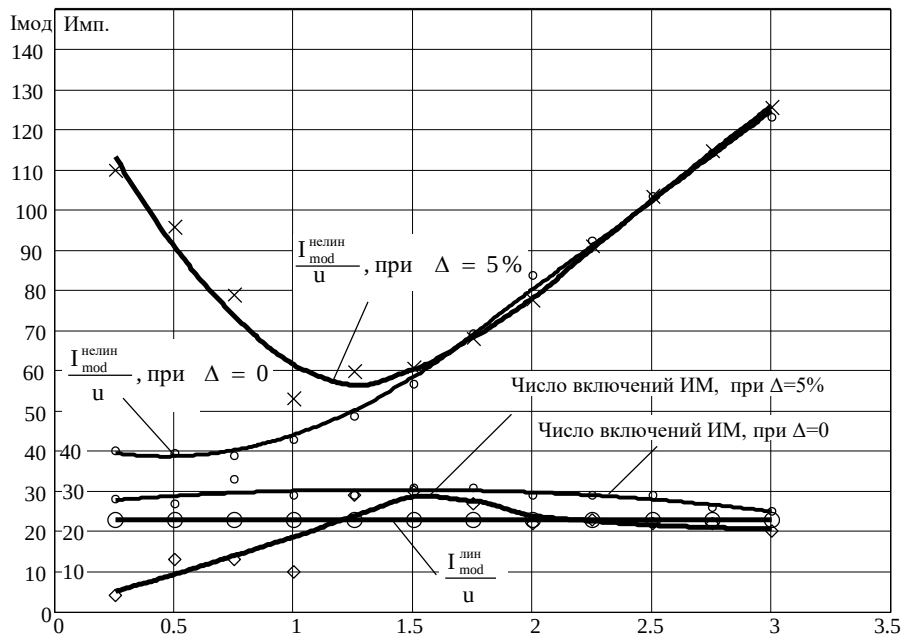


Рис. 6. Зависимость качества работы нелинейной АСР от величины возмущающего воздействия по каналу задания $u(t)$

Из рис.6 видна существенная чувствительность интеграла по модулю отнесенного к величине возмущения $\frac{I_{\text{мод}}}{u}$ к величине возмущения. При малых возмущениях $\frac{I_{\text{мод}}}{u}$ зависит от зоны нечувствительности. При уменьшении зоны нечувствительности увеличивается число включений ИМ.

По результатам проведенной работы сделаны следующие выводы:

1. В среде MathCad реализована модель нелинейной двухконтурной автоматической системы регулирования, имитирующая работу системы автоматического управления мощностью в режиме скользящего давления.

2. Выполнен поиск настроечных параметров для двухконтурной линейной АСР с ПИ-регуляторами численным методом имитационного моделирования с использованием алгоритмов оптимизации. Построены переходные процессы мощности, расхода газа, выхода корректирующего и стабилизирующего регуляторов, а также амплитудно-частотные характеристики для системы, не содержащей нелинейных элементов. Настройки регуляторов скорректированы под нелинейную систему, с добавлением критерия о минимизации числа включений исполнительного механизма.

3. Исследована чувствительность качества работы АСР к параметрам нелинейных элементов. Оценка качества работы АСР производилась по числу включений исполнительного механизма и интегралу по модулю. Выявлено, что длительность импульса ШИМ и скорость исполнительного механизма имеют минимум для исследованной системы от величины возмущающего воздействия. Увеличение же величины зоны нечувствительности и люфта однозначно приводят к увеличению интеграла по модулю, но в то же время уменьшение зоны нечувствительности значительно повышает количество включений исполнительного механизма. При этом, существенное влияние на качество работы АСР оказывает величина возмущения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бочкарева Е. Ю., Сабанин В.Р., Фейгина А.Н. Имитационное моделирование в задачах анализа и синтеза автоматических систем регулирования // Сборник трудов конференции Control 2008, МЭИ, 2008.
2. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Параметрическая оптимизация и диагностика с использованием генетических алгоритмов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. №12.
3. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Универсальная программа для оптимизации многоэкстремальных задач «Optim-MGA» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610862. Российское агентство по патентам и товарным знакам/ (РОСПАТЕНТ). Москва, 8 апреля 2004.
4. Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления// Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. №3-4.
5. Давыдов Н.И., Бояришинов Д.Г. Модельные исследования системы автоматического регулирования мощности энергоблока 800 МВт на базе его экспериментальных характеристик // Сборник трудов конференции Control 2003, МЭИ, 2003.

Разработка беспарового режима ЦВД паровой турбины Т-150 -7,7 ЛМЗ

энергоблока ПГУ-450

Сахаров К. В. , ст., Аракелян Э.К., д.т.н., проф.

В энергетическом секторе, использующем в качестве топлива природный газ или жидкое топливо, приоритет использования парогазовых установок хорошо известен. Успешная реализация ПГУ-450Т является серьезным прорывом российской энергетики в области парогазовых технологий. Вместе с тем опыт эксплуатации этих блоков выявил ряд режимных сложностей при работе энергоблока на частичных нагрузках, в том числе наличие зоны разрыва при переходе ПГУ на работу с одним котлом-утилизатором и ГТ. Это обусловлено тем, что при сбросе электрической нагрузки блока, работающего в полном составе 2 ГТ + 2КУ + 1 ПТ, с одновременным разгрузением обеих газовых турбин снижается температура газов на входе в котлы-утилизаторы, что в свою очередь приводит к снижению температуры пара на входе в паровую турбину. При достижении этой температуры величины 470-475 гр., заданной заводом-изготовителем (это происходит при относительной нагрузке 0,6-0,65), эксплуатация паровой турбины запрещается по условиям надежности паровпускных элементов турбины. Уменьшение температуры пара этого контура приводит к некоторому увеличению конечной влажности в зоне последних ступеней цилиндра низкого давления паровой турбины и, как следствие, к повышенному эрозионному износу рабочих лопаток и снижению надежности турбоустановки. Перевод же в режим работы блока в состав 1ГТ + 1КУ + 1ПТ с повышением температуры пара до номинальных значений возможно при относительной нагрузке блока 0,45 -0,5. Таким образом, в указанном интервале относительных нагрузок блока работа ЦВД паровой турбины не возможна, что накладывает ограничения в режимы эксплуатации блока [1].

Как выход из создавшейся ситуации, нами разработаны схема работы ЦВД паровой турбины в беспаровом режиме и система автоматического регулирования температурного состояния проточной части турбины в этом режиме. Под беспаровым режимом условно понимается такой режим работы ступени или группы ступеней турбины, при котором в ступенях отсутствует положительный теплоперепад в движущемся вдоль проточной части потоке пара, который в этом случае подается специально для охлаждения ступеней, или он возникает вследствие протечки пара уплотнения [2].

Автоматическое регулирование температуры ЦВД паровой турбины в беспаровом режиме является средством сохранения «горячего» резерва в энергосистеме, повышения маневренности, надежности и экономичности агрегатов ПГУ в периоды прохождения провалов графиков электрической нагрузки. Кроме того, одна из основных целей автоматического регулирования состоит в предотвращении снижения физических сроков эксплуатации ЦВД.

Тем не менее, длительная работа турбины в беспаровом режиме возможна только при выполнении ряда дополнительных изменений в технологической схеме турбоагрегата и на станции, а именно разработка схемы подачи охлаждающего пара в ЦВД турбины, выбора оптимальных значений расхода и параметров пара и т.д.

В схеме охлаждения предусматривается подача охлаждающего агента и проток пара низкого давления, подающегося на последние ступени ЦВД, через передние уплотнения в концевой подогреватель уплотнений (КПУ). При этом трехходовой клапан направляет невостребованный пар ВД в охладитель, предварительно пропустив его через регулятор давления «после себя» (давление понижается с 7.7 бар до 0.69 бар). В охладителе пар понижает свою температуру до температуры пара НД водой из коллектора между ПСГ2 и ПСГ1, которая сбрасывается в коллектор между ПСВ1 и ПСВ2. Регулирование температуры пара ВД происходит за счет изменения расхода охлаждающей воды клапаном на входе охладителя.

Дальнейшая работа связана с разработкой математической модели ступеней ЦВД при их работе в беспаровом режиме с целью выбора оптимальных характеристик системы автоматического регулирования и разработки рекомендаций для внедрения полученных результатов в практику эксплуатации энергоблоков ПГУ- 450.

Литература

1. Аракелян Э.К., Старшинов В.А. Повышение экономичности и маневренности оборудования тепловых электростанций. М.: Изд-во МЭИ, 1993, 327с.
2. Цыпин А.В. Выбор оптимальных параметров и автоматизация скользящего регулирования мощных энергоблоков .: Автореф. дис...канд. техн. наук. М., 2005.

ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРСИРУЮЩИХ КОМАНДНЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГБЛОКА

АННОТАЦИЯ

По данным, приведенным в работах [1,2], в программной среде Mathcad построена имитационная модель многосвязной системы регулирования мощности энергоблока 800 МВт, включающей котельный (КРМ) и турбинный (ТРМ) регуляторы мощности, а также регулятор топлива (РТ) и регулятор питания (РП) котла с корректором по энтальпии (КРП).

Предложена методика выбора структуры и оптимальной настройки форсирующих командных устройств (ФКУ), позволяющих минимизировать время перехода мощности с одного заданного значения на другое. Также разработана имитационная модель анализируемой системы, позволяющая активным способом получать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) по основным каналам управления с целью оценки запаса устойчивости.

Энергетический блок представляет собой сложный объект управления со многими регулируемыми параметрами. Для внешнего потребителя основным является активная электрическая мощность N , отдаваемая генератором в сеть. Система регулирования мощности должно обеспечивать изменение нагрузки и поддержание в допустимых пределах основных технологических параметров, определяющих надежность и экономичность работы энергоблока. К таким параметрам относятся давление пара перед турбиной P_m и энтальпия рабочей среды в промежуточном сечении водопарового тракта перед впрыском h_{nn} , зависящая от соотношения расходов топлива G_z и питательной воды G_{nw} . Структурная схема анализируемой системы, построенная в соответствии с данными, приведенными в работах [1,2], представлена на рис.1.

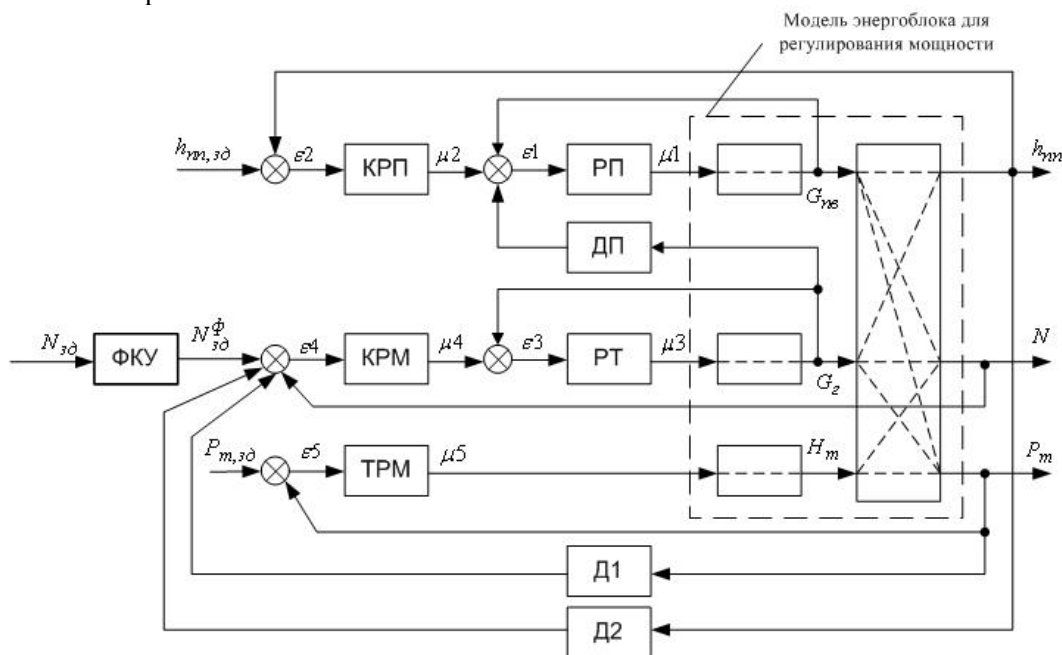


Рис.1. Структурная схема системы управления мощностью энергоблока

Анализируемый объект является многомерным с перекрестными связями. Кроме трех прямых каналов ($G_{nw} - h_{nn}$, $G_z - N$, $H_m - P_m$) он содержит пять перекрестных каналов (влияние H_m на h_{nn} пренебрежимо мало). Их динамические характеристики для реализации имитационной модели взяты из работ [1,2]. Первые две системы для регулирования h_{nn} и N реализуются в виде двухконтурных каскадных АСР. Для мощности используется

стабилизирующий регулятор топлива (РТ) и корректирующий регулятор мощности (КРМ). Для энтальпии - стабилизирующий регулятор питания (РП) и корректирующий регулятор питания (КРП). Регулирование давления пара перед турбиной осуществляется одноконтурной АСР с турбинным регулятором мощности (ТРМ).

Главное внимание в предлагаемой работе уделено котельному регулятору мощности (КРМ), основным сигналом которого является небаланс между заданным и фактическим значением мощности ($N_{зд}(t) - N(t)$). Кроме того, на КРМ подаются два скоростных сигнала по P_m и h_{mn} , формируемые дифференциаторами Д1 и Д2, соответственно. Первый из них служит для компенсации изменения H_m на КРМ. Одновременно он снижает инерционность объекта по каналу регулирующего воздействия. Скоростной сигнал по энтальпии пара h_{mn} служит для компенсации влияния изменения расхода питательной воды на суммарный сигнал, воспринимаемый КРМ. Регулятор питания (РП) кроме сигнала от КРП получает задание от динамического преобразователя (ДП) по расходу топлива G_2 .

Для форсированной реализации задания регулятору мощности в работах [1,2] используется форсирующее командное устройство (ФКУ) в виде интегро-дифференцирующего звена с передаточной функцией:

$$W_{фку,1}(s) = \frac{180 \cdot s + 1}{150 \cdot s + 1}. \quad (1)$$

В работе [3] предлагается и более сложный вариант, но без соответствующего обоснования выбора структуры форсирующего устройства и метода его настройки. Передаточная функция такого ФКУ имеет вид:

$$W_{фку,2}(s) = K \cdot \left[1 - \frac{1}{(T \cdot s + 1)^2} \right], \quad (2)$$

где K , T – настроечные параметры, которые авторы работы [3] рекомендуют выбирать в зависимости от нагрузки энергоблока.

В представленной работе сделана попытка обоснованного выбора структуры форсирующих устройств, а также предложена методика их оптимальной настройки с использованием приемов имитационного моделирования и эволюционных алгоритмов оптимизации.

Имитационная модель, реализованная в программной среде MathCad в соответствии со структурной схемой (рис.1), содержит двадцать настроечных параметров и ее прямая оптимизация является достаточно сложной задачей. Работы авторов [4,5] по многопараметрической оптимизации с использованием приемов имитационного моделирования и эволюционных алгоритмов позволяют, выбрав критерий управления и обоснованные ограничения на диапазоны управляющих воздействий, а также в случае необходимости, ограничения на запас устойчивости, оптимизировать систему в целом.

В данной работе решение подобной задачи не приводится и авторы ограничиваются лишь выбором структуры форсирующих командных устройств (ФКУ) по каналу управления мощностью энергоблока и предлагают методику их параметрической оптимизации при настройках всех регуляторов, дифференциаторов и динамического преобразователя, взятых из работ [1,2]. Упрощенная структурная схема системы автоматического управления мощностью энергоблока для такой постановки задачи представлена на рис.2.

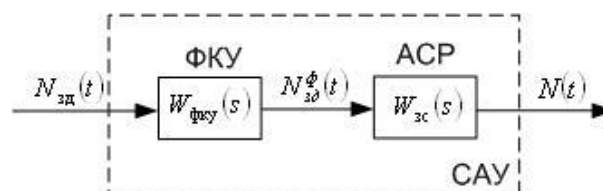


Рис.2. Упрощенная структурная схема САУ мощностью энергоблока

Схема включает в себя замкнутую автоматическую систему регулирования (АСР), которая обеспечивает ликвидацию отклонений регулируемой величины от ее заданного значения, вызванных внутренними и внешними возмущениями, и разомкнутую систему с командным форсирующим устройством (ФКУ), обеспечивающим вместе с АСР как объектом управления, оптимальный переход мощности энергоблока с одного заданного значения на другое [6]. Поскольку в системе управления с ФКУ обратная связь отсутствует, следовательно, отсутствуют и условия для появления неустойчивой работы. Изображение управляемого параметра, каким является мощность энергоблока, в этом случае запишется в виде:

$$N(s) = N_{30}(s) \cdot W_{\phi\kappa y}(s) \cdot W_{3c}(s). \quad (3)$$

Если передаточную функцию форсирующего командного устройства выбрать равной обратной передаточной функции замкнутой АСР относительно управляющего воздействия, то будет выполнено тождество $N(s) = N_{3д}(s)$. Другими словами, управляемый параметр $N(s)$ будет абсолютно точно следовать за изменением управляющего воздействия $N_{3д}(s)$. На практике реализация такого тождества не возможна. Однако, если в первом приближении реакцию линейной замкнутой АСР на единичное ступенчатое воздействие по каналу задания аппроксимировать запаздывающим звеном с эквивалентным временем запаздывания τ_3 и передаточной функцией:

$$W_{3c}^3(s) = e^{-\tau_3 \cdot s}, \quad (4)$$

то с учетом (4) передаточную функцию ФКУ, включенного перед АСР, можно записать как:

$$W_{\phi\kappa y}^3(s) = e^{\tau_3 \cdot s}. \quad (5)$$

Физическая реализация такого устройства может быть осуществлена в виде разложения в степенной ряд Лорана с использованием различного числа членов ряда [7]:

$$W_{\phi\kappa y}^3(s) = 1 + \frac{\tau_3 \cdot s}{1!} + \frac{\tau_3^2 \cdot s^2}{2!} + \frac{\tau_3^3 \cdot s^3}{3!} + \dots \quad (6)$$

Полученное выражение может быть принято за основу математического описания идеального форсирующего устройства. Для двух членов ряда это будет идеальное ПД-звено, соответственно, для трех членов идеальное ПДД²-звено.

На практике реализация производных осуществляется способом реального дифференцирования путем ввода фильтров, обеспечивающих подавление помех. При этом целесообразно для производной первого порядка фильтр выбирать как минимум в виде двух последовательно включенных апериодических звеньев, что позволит исключить скачки производных при ступенчатом изменении задания. С учетом отмеченного, передаточная функция ФКУ первого порядка запишется в виде:

$$W_{\phi\kappa y}^{3,p}(s) = 1 + \frac{K_1 \cdot T_1 \cdot s}{(T_1 \cdot s + 1)^2}. \quad (7)$$

Соответственно, передаточная функция ФКУ второго порядка запишется в виде:

$$W_{\phi\kappa y}^{3,p}(s) = 1 + \frac{K_1 \cdot T_1 \cdot s}{(T_1 \cdot s + 1)^2} + \frac{K_2^2 \cdot T_2^2 \cdot s^2}{(T_2 \cdot s + 1)^4}. \quad (8)$$

Рассматриваемая система управления имеет иерархическую структуру и задача ее оптимизации должна решаться поэтапно.

На первом этапе выбираются алгоритмы функционирования всех регуляторов, вспомогательных и корректирующих устройств. Их параметрическая оптимизация должна осуществляться в предположении, что управляющее воздействие отсутствует и объект управления находится только под действием возмущений.

На втором этапе выбирают алгоритм функционирования форсирующего командного устройства по математической модели АСР, оптимизированной на первом этапе, после чего производится его параметрическая оптимизация.

В предлагаемой статье для оптимальной настройки ФКУ использовалась авторская версия эволюционного алгоритма оптимизации “Optim-MGA” [8]. Результаты расчета в приведенном ниже примере получены с применением пользовательской программы “Optim-MGA” для математического пакета MathCad [4].

Алгоритм “Optim-MGA” работает в контексте эволюционного моделирования, в соответствии с которым множество поисковых точек представляется в виде популяции взаимодействующих особей, передвигающихся в n-мерном пространстве поиска с целью нахождения наилучшего решения на каждом шаге вычислений. В отличие от чисто генетических, алгоритм не использует операций кроссовера, мутации и инверсии. Наилучшее решение определяется в результате селекции популяции, осуществляемой путем удаления наихудших особей и заменой их потомками на каждом этапе эволюции. Для определения потомков в алгоритме используются операции метода деформируемого многогранника Нелдера - Мида, такие как отражение, растяжение, сжатие и редукция.

В качестве критерия оптимальности для расчета настроечных параметров ФКУ, реализованных по структурам (7,8), был выбран интеграл по модулю $I_{\text{мод}} = \int |N_{\text{зд}}(t) - N(t)| dt \rightarrow \min$ с ограничением на максимальное отклонение изменения регулирующего воздействия по расходу газа $\Delta G_r \leq 15.5 \%$. Это ограничение выбрано по величине таким же, как в работах [1,2] для ФКУ вида (1).

Наряду с интегральным критерием, рассматривался также критерий минимального времени перехода мощности с одного заданного значения на другое $t_{\text{пп}} \rightarrow \min$. Для такого критерия по сравнению с интегральным необходимо задавать зону нечувствительности, величина которой в значительной степени влияет на результат. К тому же, подобная задача является многоэкстремальной. Подтверждением этому являются проведенное сопоставление результатов, полученных с помощью эволюционного алгоритма “Optim-MGA”, отыскивающего глобальный экстремум, и алгоритма деформируемого многогранника Нелдера–Мида, который в зависимости от заданной начальной точки в пространстве настроечных параметров находит лишь локальный экстремум.

Известно, что качество управления в значительной степени определяется ограничениями на допустимые диапазоны изменения регулирующих воздействий. С этой целью были проведены расчеты для менее жестких ограничений на изменение расхода газа ($\Delta G_r \leq 30\%$ и $\Delta G_r \leq 60\%$). Не смотря на чисто методический характер проведенных исследований, они тем не менее отражают возможности предлагаемых структур форсирующих командных устройств и методов их настройки.

Результаты расчетов сведены в таблице.

Таблица

Структура ФКУ	Критерий	Ограничение $\Delta G_r, \%$	Настроечные параметры				Показатели качества		
			K_1	T_1	K_2	T_2	$I_{\text{мод}}$	$t_{\text{пп}}$	$N_{\text{max}}(t)$
ПД-звено (7)	$I_{\text{мод}}$	$\Delta G_r \leq 15.5$	-0.26	76.1	---	---	980	289	10.35
	$t_{\text{пп}}$	$\Delta G_r \leq 15.5$	-0.31	76.8	---	---	983	185	10.20
ПДД ² -звено (8)	$I_{\text{мод}}$	$\Delta G_r \leq 15.5$	-0.34	34.6	1.52	25.5	844	163	10.07
		$\Delta G_r \leq 30$	0.78	15.2	2.91	15.9	627	152	10.23
		$\Delta G_r \leq 60$	3.09	9.23	4.72	10.2	479	126	10.32
	$t_{\text{пп}}$	$\Delta G_r \leq 15.5$	-0.24	40.4	1.42	24.9	855	158	10.20
ИД-звено	[1,2]	$\Delta G_r \leq 15.5$	---	---	---	---	1104	391	12.24

В таблице кроме значений настроечных параметров форсирующих командных устройств, реализованных по структурам (7,8), приведены качественные характеристики переходных процессов, такие, как интеграл по модулю отклонения мощности от задания $I_{\text{мод}}$,

время переходного процесса для 2 %-ой зоны нечувствительности $t_{\text{ин}}$ и максимальное отклонение мощности от задания $N_{\text{max}}(t)$. Там же приведены результаты для временного критерия $t_{\text{ин}} \rightarrow \min$.

Переходные процессы для полученных настроек ФКУ анализировались при 10%-ом ступенчатом изменении задания котельному регулятору мощности (КРМ). Исследования проводились лишь при одном режиме работы турбинного регулятора мощности (ТРМ) как регулятора до себя (режим 2 в работах [1,2]). Дополнительно определялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) по каналу $N_{\text{зд}}(t) - N(t)$, дающие представление о запасе устойчивости по величине показателя колебательности. Оценка амплитудно-частотных характеристик из-за сложности структуры имитационной модели проводилась активным способом, путем подачи на вход гармонических колебаний в рабочем диапазоне частот с последующим вычислением отношений выходных амплитуд к входным [9].

Как уже отмечалось выше, кроме интеграла по модулю в качестве критерия оптимальности рассматривалось время переходного процесса $t_{\text{ин}}$. Однако, применение этого критерия связано с рядом затруднений. Во-первых, такая целевая функция является многоэкстремальной. Во-вторых, она является нелинейной относительно выбранной зоны нечувствительности. Все это вместе взятое склоняет к рекомендации в подобного рода исследованиях выбирать интегральный критерий, тем более, что результаты получаются практически одинаковыми.

Переходные процессы, полученные на имитационной модели при ступенчатом изменении $N_{\text{зд}}$ на 10% в сторону увеличения представлены на рис.3. Характер изменения сигнала на выходе ФКУ, реализованного по структуре (7), а также характер изменения регулирующего воздействия ΔG_r и сам переходный процесс изменения мощности показаны на рис.3,а. На рис.3,б аналогичные процессы приведены для ФКУ, реализованного по структуре (8). Для сравнения приведены аналогичные процессы, воспроизведенные по данным работ [1,2] для ФКУ вида (1).

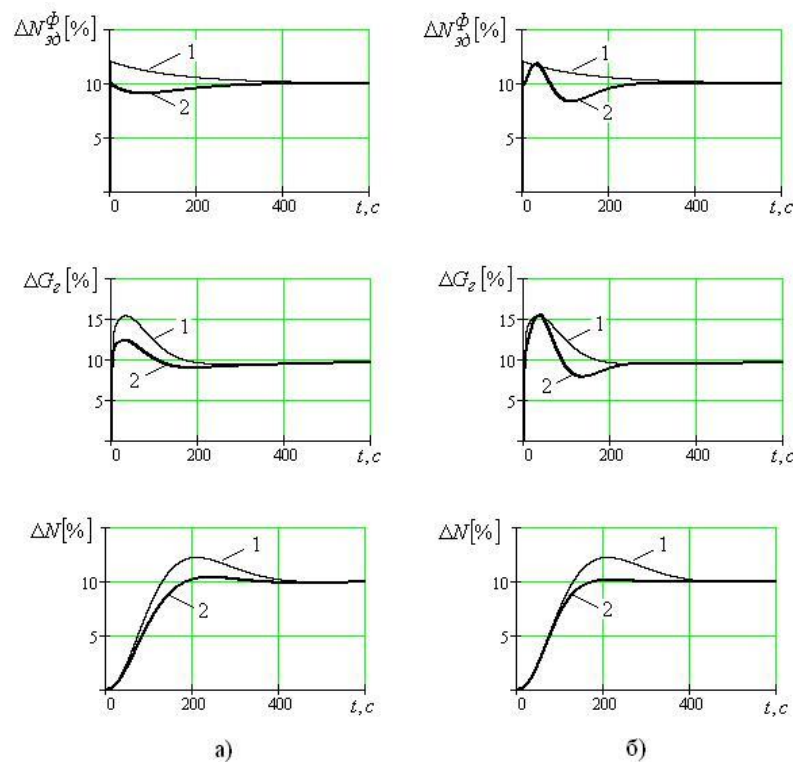


Рис.3. Переходные процессы при ступенчатом изменении $N_{\text{зд}}$ на 10%
а) ФКУ по структуре (7); б) ФКУ по структуре (8).
(1- по данным [1,2]; 2- по результатам авторов)

Анализ полученных результатов позволяет сделать некоторые выводы. В частности, ФКУ, реализованный по структуре (7), хотя и дает переходный процесс для мощности с меньшей скоростью ее нарастания, но и с меньшим отклонением от задания, что позволяет заметно снизить время переходного процесса, расчет которого проводился для 2 %-ой зоны нечувствительности. Процессы, полученные для ФКУ по структуре (8), отличаются более высокими качественными показателями.

На рис.4 в тех же обозначениях, что и на рис.3, показаны амплитудно-частотные характеристики по каналу $N_{зд}(t) - N(t)$ для структур ФКУ (7) и (8), а также по данным работ [1,2]. Приведенные АЧХ, как и ожидалось, говорят о достаточно высоком запасе устойчивости, в связи с чем подобные расчеты представляется возможным проводить без дополнительных ограничений на допустимый запас устойчивости.

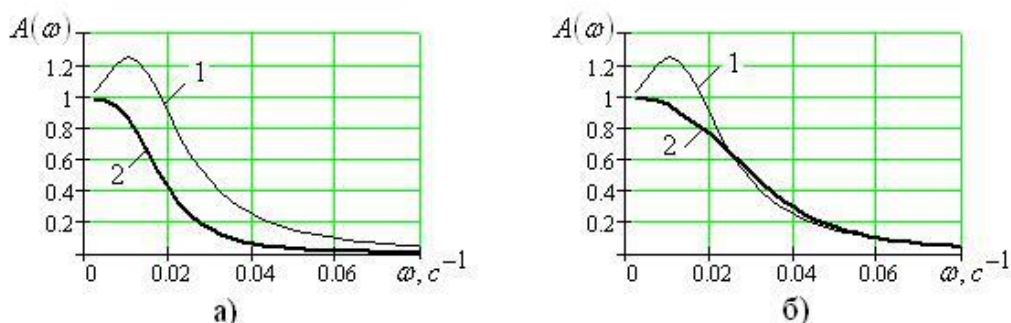


Рис.4. Амплитудно-частотные характеристики по каналу $N_{зд}(t) - N(t)$

На рис.5 представлены переходные процессы управления мощностью энергоблока для расширенного диапазона допустимых изменений расхода топлива. Из графиков видно, что при жестком соблюдении принятых ограничений заметно увеличивается скорость нарастания мощности и соответственно уменьшается время переходных процессов (численные значения приведены в таблице). Там же представлены амплитудно-частотные характеристики по каналу $N_{зд}(t) - N(t)$, соответствующие рассмотренным переходным процессам. Отмечается заметное расширение частотного диапазона практически без снижения запаса устойчивости.

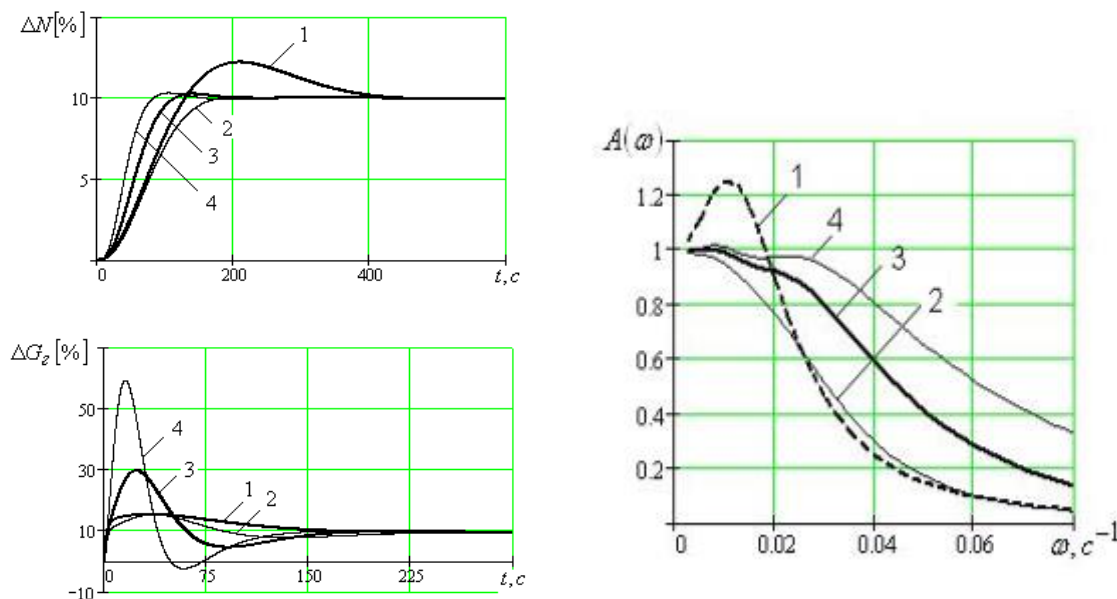


Рис.5. Переходные процессы и АЧХ по каналу $N_{зд}(t) - N(t)$

1- по данным [1,2]; 2,3,4- по результатам авторов, соответственно, для $\Delta G_r \leq 15.5\%$; $\Delta G_r \leq 30\%$ и $\Delta G_r \leq 60\%$.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- Изложенная методика обоснованного выбора структуры форсирующих командных устройств (ФКУ) в системе управления мощностью энергоблока и их оптимальная настройка позволяют повысить качественные показатели переходных процессов при ступенчатом изменении нагрузки;
- Разработана имитационная модель САУ в совокупности с форсирующими командными устройствами, позволяющая активным способом осуществлять расчет амплитудно-частотных характеристик по каналам управления;
- В целом, проведенные исследования показали, что такой подход к анализу подобных систем может обеспечить высокое качество управления при переводе сложного технологического объекта, каким является энергоблок, с одной нагрузки на другую, обеспечивая его эффективное участие в регулировании частоты и перетоков мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арефьева А.А., Бояршинов Д.Г., Давыдов Н.И.** Модельные исследования системы автоматического регулирования мощности энергоблока 800 МВт // Теплоэнергетика. 2003. № 10.
2. **Давыдов Н.И., Бояршинов Д.Г.** Модельные исследования системы автоматического регулирования мощности энергоблока 800 МВт на базе его экспериментальных характеристик // Сборник трудов конференции Control 2003, МЭИ, 2003.
3. **Давыдов Н.И., Григоренко А.А., Зорченко Н.В.** Исследование влияния форсирующих сигналов в системе автоматического управления мощностью энергоблока на его приемистость // Сборник трудов конференции Control 2005, МЭИ, 2005.
4. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления// Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. №3-4.
5. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Параметрическая оптимизация и диагностика с использованием генетических алгоритмов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. №12.
6. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: соответствуют ли ее основные положения действительности? // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. №3.
7. **Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.** Робастные многопараметрические регуляторы для объектов с транспортным запаздыванием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. №7.
8. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Универсальная программа для оптимизации многоэкстремальных задач «Optim-MGA» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610862. Российское агентство по патентам и товарным знакам/ (РОСПАТЕНТ). Москва, 8 апреля 2004.
9. **Бочкарева Е.Ю., Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Алгоритм оценки частотных характеристик систем управления методом имитационного моделирования // XII Международная конференция Радиоэлектроника, электротехника и энергетика М.,2006. Т.3. С.207-208.

ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРСИРУЮЩИХ КОМАНДНЫХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЭНЕРГООБЛОКА

АННОТАЦИЯ

По данным, приведенным в работах [1,2], в программной среде Mathcad построена имитационная модель много-связной системы регулирования мощности энергоблока 800 МВт, включающей котельный (КРМ) и турбинный (ТРМ) регуляторы мощности, а также регулятор топлива (РТ) и регулятор питания (РП) котла с корректором по энтальпии (КРП).

Предложена методика выбора структуры и оптимальной настройки форсирующих командных устройств (ФКУ), позволяющих минимизировать время перехода мощности с одного заданного значения на другое. Также разработана имитационная модель анализируемой системы, позволяющая активным способом получать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) по основным каналам управления с целью оценки запаса устойчивости.

Энергетический блок представляет собой сложный объект управления со многими регулируемыми параметрами. Для внешнего потребителя основным является активная электрическая мощность N , отдаваемая генератором в сеть. Система регулирования мощности должна обеспечивать изменение нагрузки и поддержание в допустимых пределах основных технологических параметров, определяющих надежность и экономичность работы энергоблока. К таким параметрам относятся давле-

ние пара перед турбиной P_T и энтальпия рабочей среды в промежуточном сечении водопарового тракта перед впрыском $h_{пп}$, зависящая от соотношения расходов топлива G_T и питательной воды $G_{пв}$. Структурная схема анализируемой системы, построенная в соответствии с данными, приведенными в работах [1,2], представлена на рис.1.

Анализируемый объект является многомерным с перекрестными связями. Кроме трех прямых каналов ($G_{пв} \rightarrow h_{пп}$, $G_T \rightarrow N$, $H_T \rightarrow P_T$) он содержит пять перекрестных каналов (влияние положения регулирующих клапанов турбины H_T на $h_{пп}$ пренебрежимо мало). Их динамические характеристики для реализации имитационной модели взяты из работ [1,2]. Первые две системы для регулирования $h_{пп}$ и N реализуются в виде двухконтурных каскадных АСР. Для мощности используется стабилизирующий регулятор топлива (РТ) и корректирующий регулятор мощности (КРМ). Для энтальпии — стабилизирующий регулятор питания (РП) и корректирующий регулятор питания (КРП). Регулирование давления пара перед турбиной осуществляется одноконтурной АСР с турбинным регулятором мощности (ТРМ).

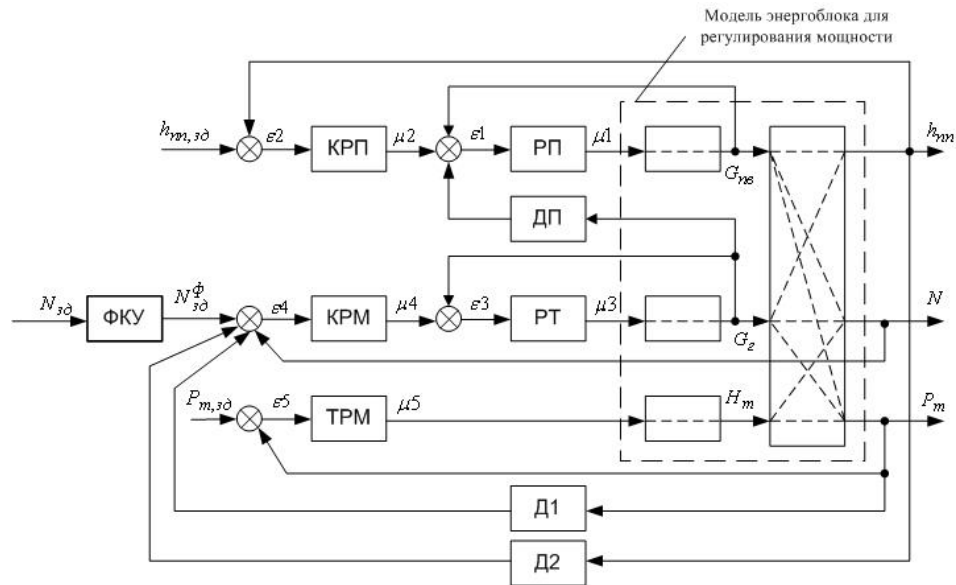


Рис.1. Структурная схема системы управления мощностью энергоблока

Главное внимание в предлагаемой работе уделено котельному регулятору мощности (КРМ), ос-

новым сигналом которого является небаланс между заданным и фактическим значением мощности

($N_{зд}(t) - N(t)$). Кроме того, на КРМ подаются два скоростных сигнала по P_T и $h_{пп}$, формируемые дифференциаторами Д1 и Д2, соответственно. Первый из них служит для компенсации изменения N_T на КРМ. Одновременно он снижает инерционность объекта по каналу регулирующего воздействия. Скоростной сигнал по энтальпии пара $h_{пп}$ служит для компенсации влияния изменения расхода питательной воды на суммарный сигнал, воспринимаемый КРМ. Регулятор питания (РП) кроме сигнала от КРП получает задание от динамического преобразователя (ДП) по расходу топлива G_T .

Для форсированной реализации задания регулятору мощности в работах [1, 2] используется форсирующее командное устройство (ФКУ) в виде интегро-дифференцирующего звена с передаточной функцией:

$$W_{ФКУ,1}(s) = \frac{180s + 1}{150s + 1}. \quad (1)$$

В работе [3] предлагается и более сложный вариант, но без соответствующего обоснования выбора структуры форсирующего устройства и метода его настройки. Передаточная функция такого ФКУ имеет вид:

$$W_{ФКУ,2}(s) = K \left[1 - \frac{1}{(Ts + 1)^2} \right], \quad (2)$$

где K , T — настроечные параметры, которые авторы работы [3] рекомендуют выбирать в зависимости от нагрузки энергоблока.

В представленной работе сделана попытка обоснованного выбора структуры форсирующих устройств, а также предложена методика их оптимальной настройки с использованием приемов имитационного моделирования и эволюционных алгоритмов оптимизации.

Имитационная модель, реализованная в программной среде MathCad в соответствии со структурной схемой (рис.1), содержит двадцать настроечных параметров и ее прямая оптимизация является достаточно сложной задачей. Работы авторов [4,5] по многопараметрической оптимизации с использованием приемов имитационного моделирования и эволюционных алгоритмов позволяют, выбрав критерий управления и обоснованные ограничения на диапазоны управляющих воздействий, а также в случае необходимости, ограничения на запас устойчивости, оптимизировать систему в целом.

В данной работе решение подобной задачи не приводится и авторы ограничиваются лишь выбором структуры форсирующих командных устройств (ФКУ) по каналу управления мощностью энергоблока и предлагают методику их параметрической оптимизации при настройках всех регуляторов, дифференциаторов и динамического преобразователя, взятых из работ [1, 2]. Упрощенная структурная схема системы автоматического управления мощностью энергоблока для такой постановки задачи представлена на рис.2.

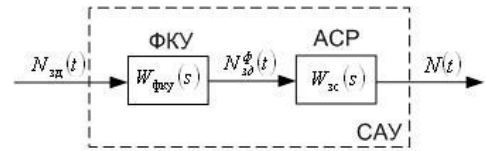


Рис.2. Упрощенная структурная схема САУ мощностью энергоблока

Схема включает замкнутую автоматическую систему регулирования (АСР), которая обеспечивает ликвидацию отклонений регулируемой величины от ее заданного значения, вызванных внутренними и внешними возмущениями, и разомкнутую систему с командным форсирующим устройством (ФКУ), обеспечивающим вместе с АСР как объектом управления, оптимальный переход мощности энергоблока с одного заданного значения на другое [6]. Поскольку в системе управления с ФКУ обратная связь отсутствует, следовательно, отсутствуют и условия для появления неустойчивой работы. Изображение управляемого параметра, каким является мощность энергоблока, в этом случае запишется в виде:

$$N(s) = N_{зд}(s) W_{ФКУ}(s) W_{зс}(s). \quad (3)$$

Если передаточную функцию форсирующего командного устройства выбрать равной обратной передаточной функции замкнутой АСР относительно управляющего воздействия, то будет выполнено тождество $N(s) = N_{зд}(s)$. Другими словами, управляемый параметр $N(s)$ будет абсолютно точно следовать за изменением управляющего воздействия $N_{зд}(s)$. На практике реализация такого тождества невозможна. Однако если в первом приближении реакцию линейной замкнутой АСР на единичное ступенчатое воздействие по каналу задания аппроксимировать запаздывающим звеном с эквивалентным временем запаздывания τ_3 и передаточной функцией:

$$W_{зс}^3(s) = e^{-\tau_3 s}, \quad (4)$$

то с учетом (4) передаточную функцию ФКУ, включенного перед АСР, можно записать как:

$$W_{ФКУ}^3(s) = e^{\tau_3 s}. \quad (5)$$

Физическая реализация такого устройства может быть осуществлена в виде разложения в степенной ряд Лорана с использованием различного числа членов ряда [7]:

$$W_{ФКУ}^{3,p}(s) = 1 + \frac{\tau_3 s}{1!} + \frac{\tau_3^2 s^2}{2!} + \frac{\tau_3^3 s^3}{3!} + \dots \quad (6)$$

Полученное выражение может быть принято за основу математического описания идеального форсирующего устройства. Для двух членов ряда это будет идеальное ПД-звено; соответственно, для трех членов — идеальное ПДД²-звено.

На практике реализация производных осуществляется способом реального дифференцирования путем ввода фильтров, обеспечивающих подавление помех. При этом целесообразно для производной первого порядка фильтр выбирать как минимум в виде двух последовательно включенных

апериодических звеньев, что позволит исключить скачки производных при ступенчатом изменении задания. С учетом отмеченного, передаточная функция ФКУ первого порядка запишется в виде:

$$W_{\text{ФКУ}}^{\text{э,р}}(s) = 1 + \frac{K_1 T_1 s}{(T_1 s + 1)^2}. \quad (7)$$

Соответственно, передаточная функция ФКУ второго порядка запишется в виде:

$$W_{\text{ФКУ}}^{\text{э,р}}(s) = 1 + \frac{K_1 T_1 s}{(T_1 s + 1)^2} + \frac{K_2^2 T_2^2 s^2}{(T_2 s + 1)^4}. \quad (8)$$

Рассматриваемая система управления имеет иерархическую структуру и задача ее оптимизации должна решаться поэтапно.

На первом этапе выбираются алгоритмы функционирования всех регуляторов, вспомогательных и корректирующих устройств. Их параметрическая оптимизация должна осуществляться в предположении, что управляющее воздействие отсутствует и объект управления находится только под действием возмущений.

На втором этапе выбирают алгоритм функционирования форсирующего командного устройства по математической модели АСР, оптимизированной на первом этапе, после чего производится его параметрическая оптимизация.

В предлагаемой работе для оптимальной настройки ФКУ использовалась авторская версия эволюционного алгоритма оптимизации «Optim-MGA» [8]. Результаты расчета в приведенном ниже примере получены с применением пользовательской программы «Optim-MGA» для математического пакета MathCad [4].

Алгоритм «Optim-MGA» работает в контексте эволюционного моделирования, в соответствии с которым множество поисковых точек представляется в виде популяции взаимодействующих особей, передвигающихся в n -мерном пространстве поиска с целью нахождения наилучшего решения на каждом шаге вычислений.

В отличие от чисто генетических, алгоритм не использует операций кроссовера, мутации и инверсии. Наилучшее решение определяется в результате

селекции популяции, осуществляемой путем удаления наихудших особей и заменой их потомками на каждом этапе эволюции. Для определения потомков в алгоритме используются операции метода деформируемого многогранника Нелдера—Мида, такие как отражение, растяжение, сжатие и редукция.

В качестве критерия оптимальности для расчета настроечных параметров ФКУ, реализованных по структурам (7), (8), был выбран интеграл по модулю $I_{\text{мод}} = \int |N_{\text{зд}}(t) - N(t)| dt \rightarrow \min$ с ограничением на максимальное отклонение изменения регулирующего воздействия по расходу газа $\Delta G_r \leq 15.5\%$. Это ограничение выбрано по величине таким же, как в работах [1, 2] для ФКУ вида (1).

Наряду с интегральным критерием, рассматривался также критерий минимального времени перехода мощности с одного заданного значения на другое $t_{\text{пп}} \rightarrow \min$. Для такого критерия по сравнению с интегральным необходимо задавать зону нечувствительности, величина которой в значительной степени влияет на результат. К тому же подобная задача является многоэкстремальной. Подтверждением этому являются проведенное сопоставление результатов, полученных с помощью эволюционного алгоритма «Optim-MGA», отыскивающего глобальный экстремум, и алгоритма деформируемого многогранника Нелдера—Мида, который в зависимости от заданной начальной точки в пространстве настроечных параметров находит лишь локальный экстремум.

Известно, что качество управления в значительной степени определяется ограничениями на допустимые диапазоны изменения регулирующих воздействий. С этой целью были проведены расчеты для менее жестких ограничений на изменение расхода газа ($\Delta G_r \leq 30\%$ и $\Delta G_r \leq 60\%$). Не смотря на чисто методический характер проведенных исследований, они тем не менее отражают возможности предлагаемых структур форсирующих командных устройств и методов их настройки.

Результаты расчетов сведены в таблице.

Т а б л и ц а

Структура ФКУ	Критерий	Ограничение $\Delta G_r, \%$	Настроечные параметры				Показатели качества		
			K_1	T_1	K_2	T_2	$I_{\text{мод}}$	$t_{\text{пп}}$	$N_{\text{max}}(t)$
ПД-звено (7)	$I_{\text{мод}}$	$\Delta G_r \leq 15,5$	−0,26	76,1	—	—	980	289	10,35
	$t_{\text{пп}}$	$\Delta G_r \leq 15,5$	−0,31	76,8	—	—	983	185	10,20
ПДД ² -звено (8)	$I_{\text{мод}}$	$\Delta G_r \leq 15,5$	−0,34	34,6	1,52	25,5	844	163	10,07
		$\Delta G_r \leq 30$	0,78	15,2	2,91	15,9	627	152	10,23
		$\Delta G_r \leq 60$	3,09	9,23	4,72	10,2	479	126	10,32
	$t_{\text{пп}}$	$\Delta G_r \leq 15,5$	−0,24	40,4	1,42	24,9	855	158	10,20
	[1,2]	$\Delta G_r \leq 15,5$	—	—	—	—	1104	391	12,24

В таблице кроме значений настроечных параметров форсирующих командных устройств, реализованных по структурам (7),(8), приведены качественные характеристики переходных процессов, такие, как интеграл по модулю отклонения мощности от задания I_{mod} , время переходного процесса для 2 %-ой зоны нечувствительности $t_{\text{пп}}$ и максимальное отклонение мощности от задания $N_{\text{max}}(t)$. Там же приведены результаты для временного критерия $t_{\text{пп}} \rightarrow \min$.

Переходные процессы для полученных настроек ФКУ анализировались при 10 %-м ступенчатом изменении задания котельному регулятору мощности (КРМ). Исследования проводились лишь при одном режиме работы турбинного регулятора мощности (ТРМ) как регулятора «до себя» (режим 2 в работах [1, 2]). Дополнительно определялись амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) по каналу $N_{\text{зд}}(t) \rightarrow N(t)$, дающие представление о запасе устойчивости по величине показателя колебательности. Оценка амплитудно-частотных характеристик из-за сложности структуры имитационной модели проводилась активным способом, путем подачи на вход гармонических колебаний в рабочем диапазоне частот с последующим вычислением отношений выходных амплитуд к входным [9].

Как уже отмечалось, кроме интеграла по модулю в качестве критерия оптимальности рассматривалось время переходного процесса $t_{\text{пп}}$. Однако применение этого критерия связано с рядом затруднений. Во-первых, такая целевая функция является многоэкстремальной. Во-вторых, она является нелинейной относительно выбранной зоны нечувствительности. Все это вместе взятое склоняет к рекомендации в подобного рода исследованиях выбирать интегральный критерий, тем более что результаты получаются практически одинаковыми.

Переходные процессы, полученные на имитационной модели при ступенчатом изменении $N_{\text{зд}}$ на 10% в сторону увеличения представлены на рис.3.

Характер изменения сигнала на выходе ФКУ, реализованного по структуре (7), а также характер изменения регулирующего воздействия ΔG_r и сам переходный процесс изменения мощности показаны на рис.3,а.

На рис.3,б аналогичные процессы приведены для ФКУ, реализованного по структуре (8). Для сравнения приведены аналогичные процессы, воспроизведенные по данным работ [1, 2] для ФКУ вида (1).

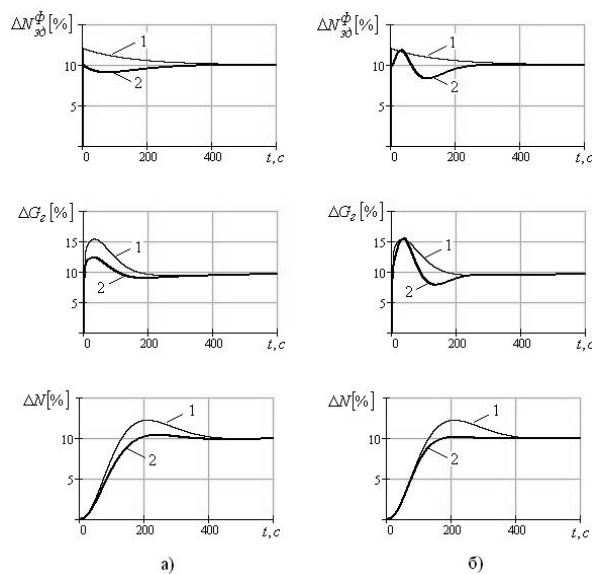


Рис.3. Переходные процессы при ступенчатом изменении $N_{\text{зд}}$ на 10%

а) ФКУ по структуре (7); б) ФКУ по структуре (8).

1 — по данным [1, 2];
2 — по результатам авторов

Анализ полученных результатов позволяет сделать некоторые выводы. В частности, ФКУ, реализованный по структуре (7), хотя и дает переходный процесс для мощности с меньшей скоростью ее нарастания, но и с меньшим отклонением от задания, что позволяет заметно снизить время переходного процесса, расчет которого проводился для 2 %-ой зоны нечувствительности. Процессы, получен-

ные для ФКУ по структуре (8), отличаются более высокими качественными показателями.

На рис.4 в тех же обозначениях, что и на рис.3, показаны амплитудно-частотные характеристики по каналу $N_{\text{зд}}(t) \rightarrow N(t)$ для структур ФКУ (7) и (8), а также по данным работ [1, 2]. Приведенные АЧХ, как и ожидалось, говорят о достаточно высоком запасе устойчивости, в связи с чем подобные расче-

ты представляется возможным проводить без дополнительных ограничений на допустимый запас устойчивости.

На рис.5 представлены переходные процессы управления мощностью энергоблока для расширенного диапазона допустимых изменений расхода топлива. Из графиков видно, что при жестком соблюдении принятых ограничений заметно увеличивается скорость нарастания мощности и соответственно уменьшается время переходных процессов (численные значения приведены в таблице). Там же представлены амплитудно-частотные характеристики по каналу $N_{зд}(t) - N(t)$, соответствующие рассмотренным переходным процессам. Отмечается

заметное расширение частотного диапазона практически без снижения запаса устойчивости.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- изложенная методика обоснованного выбора структуры форсирующих командных устройств (ФКУ) в системе управления мощностью энергоблока и их оптимальная настройка позволяют повысить качественные показатели переходных процессов при ступенчатом изменении нагрузки;
- разработана имитационная модель САУ в совокупности с форсирующими командными устройствами, позволяющая активным способом осуществлять расчет амплитудно-частотных характеристик по каналам управления;

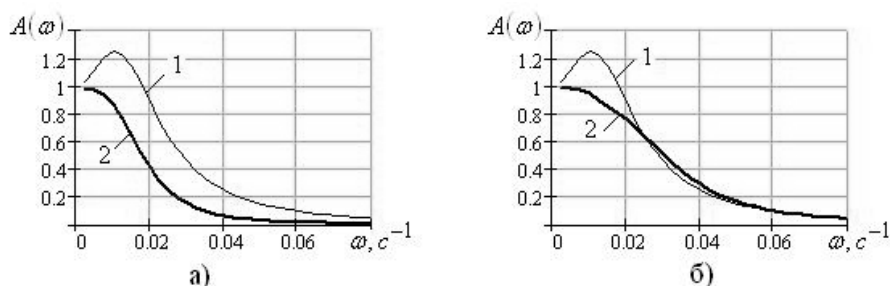


Рис.4. Амплитудно-частотные характеристики по каналу $N_{зд}(t) - N(t)$

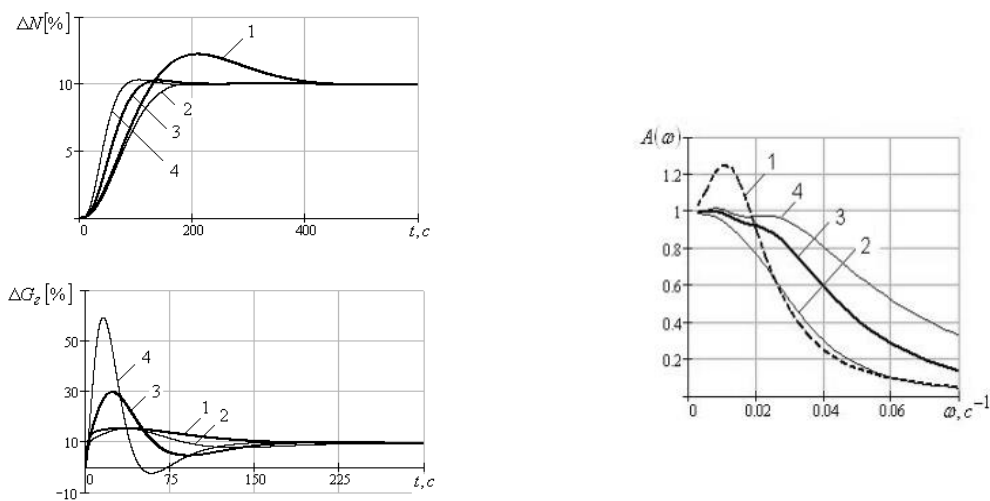


Рис.5. Переходные процессы и АЧХ по каналу $N_{зд}(t) - N(t)$

1 — по данным [1,2]; 2,3,4 — по результатам авторов, соответственно, для $\Delta G_r \leq 15,5\%$; $\Delta G_r \leq 30\%$ и $\Delta G_r \leq 60\%$

• в целом, проведенные исследования показали, что такой подход к анализу подобных систем может обеспечить высокое качество управления при переводе сложного технологического объекта, каким является энергоблок, с одной нагрузки на другую, обеспечивая его эффективное участие в регулировании частоты и перетоков мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арёфьева А.А., Бояршинов Д.Г., Давыдов Н.И. Модельные исследования системы автоматического

- регулирования мощности энергоблока 800 МВт // Теплоэнергетика. 2003. № 10.
2. Давыдов Н.И., Бояршинов Д.Г. Модельные исследования системы автоматического регулирования мощности энергоблока 800 МВт на базе его экспериментальных характеристик // Сб. тр. конференции Control 2003. М.: Изд-во МЭИ. 2003.
3. Давыдов Н.И., Григоренко А.А., Зорченко Н.В. Исследование влияния форсирующих сигналов в системе автоматического управления мощностью энергоблока на его приемистость // Сб. тр. конференции Control 2005. М.: Изд-во МЭИ. 2005.

4. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2004. № 3, 4.

1. Стр. 1 – не раскрыта H_T .(раскрыли по тексту)
2. Рисунки:
– русские и греческие буквы должны быть прямыми (см. переделанные мною формулы);
– сделать сетку черной.

5. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Параметрическая оптимизация и диагностика с использованием генетических алгоритмов // Промышленные АСУ и контроллеры. 2004. №12.
6. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления: соответствуют ли ее основные положения действительности? // Промышленные АСУ и контроллеры. 2007. №3.
7. **Смирнов Н.И., Сабанин В.Р., Репин А.И.** Робастные многопараметрические регуляторы для объектов с транспортным запаздыванием // Промышленные АСУ и контроллеры. 2006. №7.
8. **Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И.** Универсальная программа для оптимизации многоэкстремальных задач «Optim-MGA» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2004610862. Российское агентство по патентам и товарным знакам / (РОСПАТЕНТ). Москва, 8 апреля 2004.
9. **Алгоритм** оценки частотных характеристик систем управления методом имитационного моделирования / Е.Ю. Бочкарева, В.Р. Сабанин, Н.И. Смирнов, А.И. Репин // XII Международная конференция Радиоэлектроника, электротехника и энергетика М. 2006. Т.3. С. 207—208.

Система автоматизированного проектирования функциональных схем на базе AUTOCAD 2007

Смирнова М.Ю. ст., доц. Зверьков В.П.

Московский энергетический институт (технический университет)

Функциональные схемы являются основным техническим документом, определяющим функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса и оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации.

При разработке функциональных схем автоматизации необходимо решить следующее:

- получение первичной информации о состоянии технологического процесса и оборудования;
- непосредственное воздействие на технологический процесс для управления им;
- стабилизация технологических параметров;
- контроль и регистрация технологических параметров процессов и состояния технологического оборудования.

Указанные задачи решаются на основании анализа условий работы технологического оборудования, выявленных законов и критериев управления объектом, а также требований, предъявляемых к точности, стабилизации, контролю и регистрации технологических параметров, к качеству регулирования и надежности. Функциональные задачи автоматизации, как правило, реализуются с помощью технических средств, включающих в себя: отборные устройства, средства получения первичной информации, средства преобразования и переработки информации, средства предоставления и выдачи информации обслуживающему персоналу, комбинированные, комплектные и вспомогательные устройства.

Результатом составления функциональных схем являются:

- выбор методов измерения технологического параметра;
- выбор основных технических средств автоматизации, наиболее полно отвечающих предъявляемым требованиям и условиям работы автоматизируемого объекта;
- определение приводов исполнительных механизмов регулирующих и запорных органов технологического оборудования, управляемого автоматически или дистанционно;
- размещение средств автоматизации на щитах, пультах, технологическом оборудовании и трубопроводах и т.п. и определение способов предоставления информации о состоянии технологического процесса и оборудования.

В представленной системе автоматизированного проектирования функциональных схем на базе AutoCAD 2007 была разработана база данных на средства автоматизации, наиболее часто используемые на энергетических (промышленных) объектах при проектировании АСУ, с условными обозначениями по ГОСТ 21.404-85 и их расшифровкой.

Для выбора того или иного прибора следует знать его назначение и рабочую среду. Эта база данных является исходной. В нее занесены все данные о приборах, которые в дальнейшем транслируются в спецификацию. При необходимости данные можно корректировать. Для сравнения параметров приборов и выбора оптимального в системе существует расширенный каталог.

Спецификация формируется автоматически для всех приборов, нанесенных на функциональную схему, и включает в себя данные о параметрах среды, характеристиках оборудования, количестве, производителе и т.д. и может быть представлена в любой удобной форме и формате для работы в AutoCAD, Excel, Access, Блокнот.

Система автоматизированного проектирования функциональных схем позволяет сократить время разработки проектной документации, так как в ней сосредоточена и структурирована вся необходимая информация для составления функциональных схем и спецификаций. Для работы с системой составлена подробная инструкция для пользователя.

Для использования системы необходимы минимальные аппаратные и программные средства: процессор не ниже Pentium 1000 МГц, ОЗУ 256 Мб, видеокарта 32 Мб, 500Мб свободного места на HDD, Windows XP, AutoCAD 2007, MS Office 2003.

Список литературы

1. ГОСТ 21.404-85. Обозначения условные в схемах автоматизации технологическими процессами;
2. Клюев А.С., Глазов Б.В., Дубровских А.Х., Клюев А.А., Проектирование систем автоматизации технологических процессов. Справочное пособие, М.: Энергоатомиздат, 1990;
3. AutoCad2007 и AutoCAD LT 2007, Библия пользователя, ИД Вильямс, 2007;

Разработка алгоритмов настройки регуляторов на базе непараметрических моделей

Зверьков В.П., Кузицин В.Ф., Солодовников А.С.

Московский энергетический институт (Технический университет)

Для подавляющего большинства реальных технологических объектов в процессе эксплуатации свойственно существенное изменение их динамических характеристик, что обуславливает возникновение задачи адаптации систем управления к изменяющимся условиям работы технологического оборудования. Данная задача возникает и на этапе ввода систем управления в действие в связи с недерминированностью технологических объектов.

Обзор зарубежной и отечественной литературы [1,3] показал, что существующие в настоящее время алгоритмы адаптивной настройки систем управления, реализованные как в промышленных контроллерах, так и в отдельном программном обеспечении для настройки, преимущественно используют параметрические модели объектов управления, параметры которых определяются проведением активного эксперимента с подачей идентифицирующего воздействия в разомкнутый или замкнутый контур управления. В качестве модели наиболее часто используется совокупность апериодического звена и звена запаздывания. Однако, с помощью последней оказывается сложным достаточно точно описать многие технологические процессы. При этом аппроксимация экспериментальных данных всегда сопровождается наличием ее некоторой ошибки.

В то же время, сложность реализации пассивной идентификации объекта [2] делает активный эксперимент необходимостью. В связи с этим, первоочередной становится задача минимизации потерь качества управления и длительности потерь в процессе идентификации. Одним из возможных путей сокращения времени идентификации объекта может являться проведение активного эксперимента подачей импульса с наименьшей длительностью, при которой обеспечивается заданная точность настройки. Дальнейший перевод полученной импульсной переходной характеристики в комплексную частотную, как посредством непосредственного ее пересчета, так и при помощи преобразования Фурье исключает использование параметрических моделей объекта в алгоритме динамической настройки регуляторов.

Одним из важных вопросов идентификации объекта при работе предлагаемого алгоритма является определение минимальной длительности импульса из условия минимизации потерь качества управления в процессе проведения эксперимента и получения параметров настройки с допустимой погрешностью. Минимальная длительность импульса определялась с помощью вычислительного эксперимента для широкого круга моделей объекта, в процессе которого для различной длительности импульса определялась импульсная переходная характеристика объекта при наличии помех, пересчитывалась в комплексную частотную характеристику и по ней определялись параметры настройки регулятора. Найденные значения сравнивались с параметрами настройки эталонными для данного объекта.

Другим не менее важным вопросом является определение возможности использования двух перечисленных выше методик перевода экспериментальных данных, полученных во временной области, в частотную. В процессе исследования ставилась задача определения предпочтительности применения каждой из методик для реализации в микропроцессорных контроллерах. При этом основными признаками сопоставления являлись универсальность методик, соотношение точности получаемых настроек со сложностью метода и необходимых вычислительных ресурсов.

В докладе приводятся результаты проработки поставленных задач и, как итог, алгоритм динамической настройки регуляторов на базе непараметрических моделей.

Список литературы

1. Ротач В.Я. Адаптация в системах управления технологическими процессами.// Промышленные АСУ и контроллеры, №1. – 2005.
2. Ротач В.Я. По поводу работ, связанных с идентификацией объектов в условиях их нормального функционирования.// Автоматика и телемеханика. 1969. №6.
3. Li, Y. and Ang, K.H. and Chong, G.C.Y. (2006) Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art. IEEE Control Systems Magazine 26(1):pp. 42-54.

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЫЛЕСИСТЕМЫ ПРЯМОГО ВДУВАНИЯ ТОПЛИВА С МОЛОТКОВЫМИ МЕЛЬНИЦАМИ*

АННОТАЦИЯ

Получена система нелинейных дифференциальных уравнений, которую можно рассматривать как математическую основу для создания высокоточных всережимных динамических моделей пылесистем прямого вдувания. Приведены результаты исследования имитационной модели пылесистемы с молотковыми мельницами.

Физика формирования топливовоздушных потоков в мельничных системах отличается сложностью протекания мельничных процессов, отсутствием необходимой и достаточной информации о параметрах, характеризующих динамические особенности полидисперсных массопотоков в системе мельница-сепаратор [1—5 и т.п.]. Поэтому до сих пор не удавалось построить адекватную по сложности математическую модель пылесистем рассматриваемого класса [6, 7].

В работах [8, 9] получена система нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которую можно рассматривать как математическую основу для создания высокоточных всережимных динамических моделей рассматриваемого класса технологических объектов управления. Здесь в качестве типового (тиражируемого) макрообъекта моделирования рассматривается нитка пылесистемы прямого вдувания потока топливовоздушной смеси в топку парового котла, отличающаяся тем, что пылесистема реализована на базе серийной молотковой мельницы ММТ 1500/2510-735 с гравитационным сепаратором при работе на непроектном топливе (Подмосковный бурый уголь, котел ТП-208, блок 200 МВт).

Основные допущения

Анализ технологических особенностей основных вариантов принципиальных схем индивидуальных замкнутых пылесистем прямого вдувания позволяет представить схему движения потоков массы рабочего тела и сушильно-вентилирующего агента в виде открытой поточной системы. В открытой поточной системе поток вещества входит в систему при некоторых начальных параметрах, совершает в установке определенную работу и теплообмен и выходит из системы в другом месте при конечных расчетных параметрах [10]. Представленная схема поточной структуры модели сохраняет свои функ-

циональные связи вне зависимости от типа мельничной установки и вида топлива, т.е. является обобщенной. Определим основные физические переменные обобщенной системы пылеприготовления и принимаемые далее основные допущения (исходные посылки).

1. На физические переменные (технологические параметры: расход сушильно-вентилирующего агента, загрузка мельницы топливом, температура аэросмеси, влажность пыли и др.) накладываются заданные типоразмером мельницы расчетно-конструкторские ограничения, при выполнении которых имеет место устойчивый массопоток топливовоздушной смеси [1, 3, 4 и т.п.]. Иными словами, сохраняется баланс между подачей сырого топлива и выдачей готовой пыли и обеспечиваются штатные (нормальные, расчетные) режимы работы пылесистемы, при которых мельница и топливоприготовительная установка в целом могут работать устойчиво сколь угодно долгое время. Критические режимы (завал мельницы, переход на другой вид твердого топлива и т.п.) в настоящей работе не рассматриваются.

2. Распределение пыли внутри объема мельницы и в потоке мельничного продукта, по-видимому, неравномерное (неизвестное). Однако учитывая, что угольная пыль хорошо транспортируется потоком сушильно-вентилирующего агента, а пылевоздушная смесь образует подвижную эмульсию [1, 2], для устойчивого массопотока принимается, что характеристики потока (концентрация, скорость движения, температура) однозначно определяют его состояние. При этом химические реакции между компонентами пылевоздушной смеси отсутствуют.

3. Скорость центра масс «элементарного объема» (размеры которого не определены) для всех компонентов многофракционного потока топливовоздушной смеси в системе пылеприготовления принимается при допущении, что сушка топлива заканчивается в объеме мельницы и расход сушильно-вентилирующего агента по пространственным координатам не изменяется. При этом скорость центра масс «элементарного объема» потока топливовоздушной смеси определяется некоторой относительной скоростью отработанного сушильного агента в продольном сечении ротора мельницы (как

* Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований: проект №07-08-00360 «Развитие методов феноменологической термодинамики для построения высокоточных нелинейных динамических моделей технологических объектов управления с аккумуляцией топлива в каналах формирования потоков топливовоздушных смесей»

расход отработанного сушильного агента, отнесенный к сечению ротора мельницы) [3, 4, 5]:

$$v_c = \frac{G_c}{LD}, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где L, D — длина и диаметр ротора мельницы.

4. Оценку плотности ρ_3 «элементарного объема» потока мельничного продукта (пылевоздушной смеси в объеме установки) определим через отношение массы топлива, заполняющего установку, циркулирующего в системе мельница-сепаратор и питающего поток мельничного продукта, к объему системы:

$$\rho_3 = \frac{M}{V}, \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

5. Методика определения массы M топлива, заполняющего систему мельница-сепаратор (массовая загрузка молотковой мельницы), изложена в [7].

6. Плотность ρ_2 «элементарного объема» потока готовой топливовоздушной смеси определим как отношение массы готовой пыли, аккумулированной в объеме системы, к этому объему:

$$\rho_2 = \frac{M_{\text{п}}}{V}, \text{ кг/м}^3. \quad (3)$$

7. Масса готовой пыли, которая аккумулирована (содержится) в объеме системы мельница—сепаратор, может быть определена через ее концентрацию ρ_2^* в потоке готовой первичной топливовоздушной смеси, покидающей установку, умноженной на объем системы:

$$M_{\text{п}} = \rho_2^* V, \quad (4)$$

где концентрация определяется как отношение расхода B_2 готового продукта к расходу G_c отработанного сушильного агента:

$$\rho_2^* = \frac{B_2}{G_c}. \quad (5)$$

В индивидуальных системах пылеприготовления (располагаемых непосредственно у котла) концентрация пыли в потоке топливовоздушной смеси сравнительно невелика и составляет от 0,5 до 1,0 кг пыли на кг воздуха [1].

8. Концентрация мельничного продукта, покидающего размольную камеру, в потоке сушильно-вентилирующего агента

$$\rho_3^* = \frac{B_3}{G_c}, \text{ кг/м}^3 \quad (6)$$

определяется отношением расхода B_3 мельничного продукта к расходу G_c отработанного сушильно-вентилирующего агента.

9. Для устойчивого массопотока можно полагать, что плотность мельничного продукта в объеме пылесистемы и концентрация пыли в потоке мельничного продукта на входе в сепаратор имеют определенное соответствие:

$$\rho_3 \geq \rho_3^*. \quad (7)$$

Анализ исходных посылок

Полагая, что (7) есть равенство (открытый ротор, шахтный сепаратор, несущественная циркуляция топлива в камере размола), тогда согласно [6, 7]

$$\frac{B_3}{G_c} = \frac{M}{V}, \text{ кг/м}^3, \quad (8)$$

и недоступный для непосредственного контроля расход мельничного продукта может быть определен как произведение:

$$B_3 = \frac{1}{V} M G_c, \text{ кг/с}. \quad (9)$$

Выражение (9) определяет способ формирования сигнала по косвенной оценке расхода мельничного продукта и дает строгое обоснование решению [12], где полагается, что произведение сигналов по загрузке мельницы и расхода сушильно-вентилирующего агента $B_2 \approx N_m G_v$ есть «импульс по расходу пыли» из молотковой мельницы.

Если при этом положить, что

$$B_3 = k_x B_2, \quad (10)$$

то получаем известное допущение математической модели П. Профоса [6]:

$$k_x \frac{B_2}{G_c} = \frac{M}{V}, \quad (11)$$

где B_2 — расход готовой пыли; k_x — коэффициент, определяемый согласно [6] экспериментально.

Для современных мельничных систем (закрытый ротор, вынесенный сепаратор: инерционный, центробежный) имеет место существенная кратность циркуляция топлива в камере размола и зоне сепарации, то надо, по-видимому, полагать, что

$$\rho_3 > \rho_3^*. \quad (12)$$

При этом формальная запись выражения (11) остается без изменений, а экспериментальный коэффициент k_x приобретает некоторое новое содержание, связанное как с трансформацией потока в сепараторе, так и с условиями его формирования в камере размола. В результате недоступный для непосредственного контроля расход мельничного продукта можно определить динамическим комплексом в виде

$$B_3 = \alpha \frac{1}{V} M G_c, \text{ кг/с}, \quad (13)$$

где коэффициент $\alpha \leq 1$ учитывает циркуляцию топлива в мельнице и первой ступени сепарации, например, на уровне выхода из камеры размола или на уровне входа потока мельничного продукта в сепаратор.

Анализ системы дифференциальных уравнений математической модели

В основу исследуемой ниже имитационной модели положены уравнения математической модели с сосредоточенными параметрами [8, 9].

Уравнения материального баланса:

- для количества топлива, циркулирующего в системе мельница—сепаратор:

$$\frac{dM}{dt} = B_1 - k_b B_2; \quad (14)$$

• потока мельничного продукта:

$$\frac{dB_3}{dt} = (\bar{B}_1(c) - \alpha B_3) \frac{B_3}{M}; \quad (15)$$

• потока готовой топливовоздушной смеси:

$$\frac{dB_2}{dt} = (\alpha B_3 - k_b B_2) \frac{G_c}{V}, \quad (16)$$

где B_1 — расход сырого топлива, кг/с; k_b — коэффициент пересчета на влажность топлива; B_2 — расход готовой пыли, кг/с; B_3 — расход мельничного продукта; M — масса топлива, циркулирующего в системе «мельница—сепаратор»; α — коэффициент учета циркуляции топлива в системе «мельница—сепаратор»; $\bar{B}_1(c)$ — расчетная размольная производительность мельницы, кг/с.

Уравнение теплового баланса:

$$(c_T M + c_M m_M) \frac{dT_{ce}}{dt} = Q_1 - Q_2, \quad (17)$$

где

$$Q_1 = G_v c_v (t_v + 273) \rho_v + K_{мех} N_{уд} M;$$

$$Q_2 = \frac{W_p - W_n}{100 - W_n} (2490,5 + 1,9 T_{ce} - 4,19 t_T) B_1 +$$

$$+ G_c c_c \rho_c (T_{ce} - 5) + 42 L +$$

$$+ \frac{100 - W_p}{100} \left(c_T^c + \frac{4,19 W_n}{100 - W_n} \right) (T_{ce} - t_T) B_1;$$

c_T — теплоемкость сырого топлива, Дж/кг·°К;

T_{ce} — температура аэросмеси за сепаратором, °С;

Q_1 — теплота, подводимая в мельницу, Дж/с;

Q_2 — теплота, отводимая из мельницы, Дж/с;

G_v — расход первичного воздуха, м³/с;

c_v — теплоемкость первичного воздуха, Дж/кг·°К;

t_v — температура первичного воздуха, °С;

ρ_v — плотность первичного воздуха, кг/м³;

$K_{мех}$ — коэффициент механических потерь в тепло при измельчении угля;

$N_{уд}$ — удельная мощность, прикладываемая к единице массы размалываемого топлива, Вт/кг;

W_p — влажность сырого топлива, %;

W_n — влажность пыли, %;

c_T^c — теплоемкость сухой массы топлива, Дж/кг·°К;

t_T — температура сырого топлива, °С;

c_c — теплоемкость сушильного агента, Дж/кг·°К;

ρ_c — плотность сушильного агента за сепаратором, кг/м³.

Дополнительно к системе (14) — (17) необходимо рассмотреть уравнение состояния в виде нелинейного эмпирического выражения расчетной размольной производительности мельницы [5—7]:

$$\bar{B}_1(c) = a C_{конст} K_{рзм} K_{тонк} K_{вент} (1,43 N_i - 1)^n. \quad (18)$$

где a , n — коэффициенты, учитывающие тип мельницы и сепаратора; $C_{конст}$ — коэффициент, характеризующий конструктивные особенности мельницы; $K_{рзм}$ — коэффициент, характеризующий размол в мельнице; $K_{тонк}$ — коэффициент, характеризующий тонину помола; $K_{вент}$ — коэффициент, характеризующий вентиляцию мельницы; N_i — относительная мощность электродвигателя мельницы.

Открытость распределенной модели [10] позволяет развить результат [11] путем подключения к системе (14—18) аэродинамических уравнений. Тогда:

$$\frac{dB_3}{dt} = \frac{B_3}{G_c} \frac{dG_c}{dt} + (\bar{B}_1(c) - \alpha B_3) \frac{B_3}{M}; \quad (19)$$

$$\frac{dG_c}{dt} = - \frac{(LD)^2}{M} (H_x - H_p) - LDg - \frac{G_c}{V} (K_v G_c - G_v), \quad (20)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = - \frac{MG_c}{VLD} g + \frac{G_c}{V} (P_1 - P_2) - \frac{MG_c^2}{V^2 (LD)^2} (K_v G_c - G_v) + \frac{1}{V} \left(\frac{1}{2} \frac{G_c^2}{(LD)^2} + \frac{V}{LD} g \right) \frac{dM}{dt}, \quad (21)$$

где P_1 — давление сушильно-вентилирующего агента в коробе первичного воздуха (перед мельницей); P_2 — давление сушильно-вентилирующего агента за мельницей (в пылепроводе); $\Delta P = P_1 - P_2 = H_x - H_p$ — гидравлическое сопротивление мельничной установки с вращающимся ротором (перепад давления на мельнице), определяемое по нелинейному эмпирическому выражению [4].

Исследование имитационной модели пылесистем прямого вдувания топлива

Результаты исследования математической модели (14—21) выполнены универсальными инструментальными средствами имитационного моделирования. Динамические характеристики пылесистемы определялись по результатам вычислительных экспериментов при ступенчатых изменениях подачи сырого топлива и расхода первичного воздуха в мельницу.

План эксперимента состоял из двух этапов. На первом этапе проведены исследования имитационной модели в номинальном режиме при малых возмущениях (линейные диапазоны) подачи топлива и первичного воздуха в мельницу. Переходные характеристики показаны как для известных контролируемых параметров (расход первичного воздуха, температура за мельницей, загрузка мельницы), так

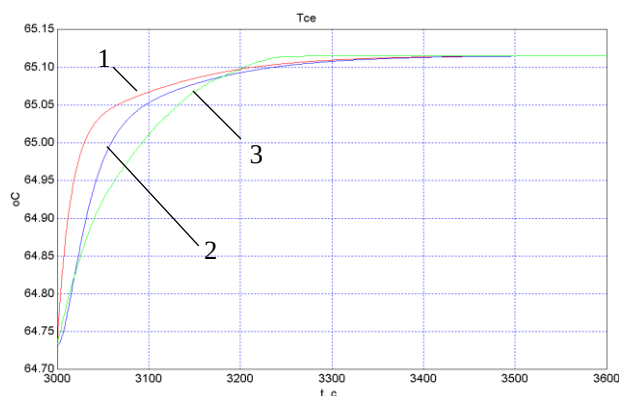


Рис. 1. Сравнение переходных процессов при
 $B_1 = 6,9 \text{ кг/с}; G_v = 10 \text{ м}^3/\text{с}$
 Возмущение первичным воздухом $\Delta G_v = 0,1 \text{ м}^3/\text{с}$.
 Сигнал по температуре за сепаратором:
 1 — аналитический; 2 — аналитический + термopара
 (модель первого порядка); 3 — экспериментальный

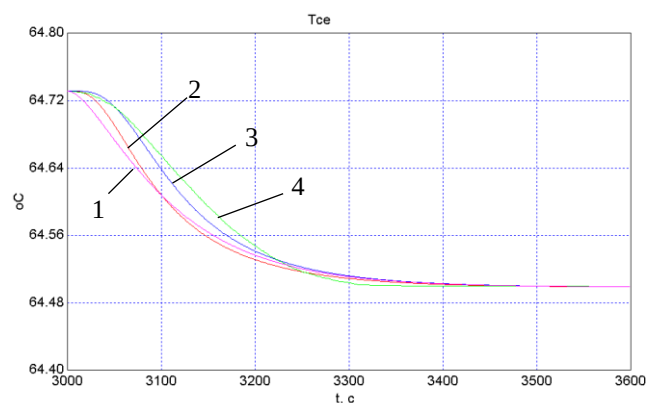


Рис. 2. Сравнение переходных процессов при
 $B_1 = 6,9 \text{ кг/с}; G_v = 10 \text{ м}^3/\text{с}$
 Возмущение расходом топлива $\Delta B_1 = 0,1 \text{ кг/с}$.
 Сигнал по температуре за сепаратором:
 1 — аналитический; 2 — аналитический + ПСУ;
 3 — аналитический + ТП + ПСУ;
 4 — экспериментальный

и для новых показателей, полученных в результате обобщенного термодинамического анализа пылесистемы [16].

На втором этапе проведены исследования имитационной модели с учетом влияния на переходные процессы характеристик датчиков и исполнительных устройств путем сравнения аналитических и экспериментальных переходных характеристик [7, 14]. Это позволило качественно оценить (верифицировать) адекватность динамических свойств по основным каналам регулирующих воздействий. С этой целью для параметров, доступных для непосредственного контроля, подключены соответствующие модели датчиков и исполнительных устройств (рис. 1, 2)

Результаты выполненных исследований модели, говорят о возможности создания высокоточной настраиваемой нелинейной динамической имитационной модели пылесистемы прямого вдувания топлива с молотковыми мельницами. Разработанная модель используется в составе многоцелевого тренажерного комплекса котла ТП-208 полигонной версии АСУ ТП энергоблока 200 МВт.

При разработке соответствующих программно-аппаратных средств «погружения» имитационной модели в среду реального времени ПТК возможно ее использование в интеллектуальных АСУ ТП для целей управления и диагностирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хзмалян Д.М., Каган Я.А. Теория горения и топочные устройства / под ред. Д.М. Хзмаляна. М.: Энергия, 1976. 488 с.
2. Лузин П.М. О процессе размола в молотковой мельнице // Теплоэнергетика. 1965. № 6. С. 10—14.
3. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов (нормативные материалы). Л.: ЦКТИ, 1971. 309 с.

4. Осокин В.П. Молотковые мельницы. М.: Энергия, 1980. 176 с.
5. Левит Г.Т. Пылеприготовление на тепловых электростанциях. М.: Энергоатомиздат, 1991. 382 с.
6. Профос П. Регулирование паросиловых установок: Пер. с нем. / Под ред. Н.И. Давыдова. М.: Энергия, 1967.
7. Тверской Ю.С. Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания. М.: Энергоатомиздат, 1996. 256 с.
8. Тверской Ю.С., Тверской Д.Ю. Теоретические основы динамических моделей каналов формирования потоков топливовоздушных смесей в топку котлов / Иван. гос. энерг. ун-т. Иваново, 2002. 74 с. Деп. в ВИНТИ 18.01.02 № 86-В2002.
9. Имитационная модель пылесистем по схеме прямого вдувания паровых котлов (теоретические основы и технология реализации в составе АСУТП) / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов, Д.Ю. Тверской и др. // Теплоэнергетика. 2005. № 9. С. 61—69.
10. Калафати Д.Д. Применение первого закона термодинамики для закрытых поточных систем: учебное пособие. М.: Издательство МЭИ, 1989. 80 с.
11. Теплотехнический справочник / под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. М.: Энергия, Т.1. 1975. 744 с. Т.2. 1976. 896 с.
12. Буханов Ю.В., Мальгавка В.В. Регулирование загрузки мельницы первичным воздухом: инф. листок № 726-79. Свердловск: ЦНТИ, 1979.
13. Тверской Д.Ю. Методика термодинамического анализа пылесистем прямого вдувания паровых котлов электростанций / В кн. Материалы научно-техн. конф. «Управление в технических системах». Ковров: КГТА, 1998. С. 95—97.
14. Фонд экспериментальных динамических характеристик паровых котлов тепловых электрических станций / Д.Ю. Тверской, И.Е. Харитонов, С.А. Таламанов, Ю.С. Тверской // Теплоэнергетика. 2005. №10. С. 32—35.

РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ НАСТРОЙКИ КАСКАДНОЙ СИСТЕМЫ С ДВУМЯ РЕГУЛЯТОРАМИ

Аннотация

Рассматриваются вопросы построения алгоритма итерационной настройки регуляторов каскадной системы регулирования. Алгоритм основан на одновременном поиске оптимума настройки параметров регуляторов внешнего и внутреннего контура.

Одноконтурная система регулирования с ПИД-регулятором является лучшей для использования в простейших схемах регулирования. Очень часто на практике возникает ситуация, когда качество работы одноконтурной системы с ПИД-регулятором оказывается неудовлетворительным. Это скорее всего свидетельствует о необходимости усложнения информационной структуры системы, т.е. о необходимости введения добавочных каналов связи регулятора с объектом. Объясняется это тем, что во всякой информационной структуре имеется предел достижимой точности регулирования, обусловленной, в частности, наличием запаздывания в регулирующем канале объекта. Преодолеть этот предел, оставаясь в рамках одной и той же структуры, принципиально невозможно никаким усовершенствованием алгоритмов регулирования.

Одним из основных способов усложнения информационной структуры системы регулирования является применение системы со вспомогательными регулируемыми величинами. Смысл ее заключается в том, что в регулятор вводится добавочная информация об изменении некоторых специально подобранных величин более оперативно, чем управляемая величина, характеризующих изменение текущего состояния объекта. Как и при расчете одноконтурных систем, расчет настройки сложных структур САУ связан с поиском минимума показателя точности регулирования с учетом ограничений, прежде всего – ограничения на запас устойчивости. Однако при наличии нескольких замкнутых контуров требования к запасу устойчивости усложняются – необходимо, чтобы этим запасом обладали все контуры одновременно. Решение такой задачи приходится осуществлять с помощью многошаговых поисковых алгоритмов.

Обычно расчет таких систем производят последовательно по контурам: задавая некоторой начальной настройкой регулятора, производят расчет настройки корректора, считая систему одноконтурной, затем производят расчет регулятора, считая систему одноконтурной с известной настройкой корректора и т.д. Недостатком такого алгоритма является недосказанность его сходимости к истинному оптимуму, поэтому лучше использовать метод многоуровневого сканирования, суть которого заключается в одновременном поиске настроек стабилизирующего и корректирующего регуляторов.

Алгоритм поиска настроек, основанный на подаче в систему ступенчатых воздействий, имеет недостаток. Он заключается в слабой помехозащищенности. В связи с этим предпочтение отдают синусоидальным идентифицирующим воздействиям. Организация настройки заключается в процедуре «идентификации-оптимизации» системы после каждой оценки вектора КЧХ. Для этого, задавшись предварительно подходящей моделью объекта со свободными коэффициентами, по полученному вектору объекта определим численные значения этих коэффициентов. Это позволяет рассчитать очередную настройку регулятора и резонансную частоту при этой настройке, что позволяет выбрать и частоту синусоидального воздействия на следующем шаге. После установки этих параметров в регуляторе и ГСК эксперимент и расчет повторяются. В результате возникает итерационная процедура, которая продолжается до тех пор, пока не будет достигнут оптимум настройки.

Список литературы.

- 1. Ротач В.Я. Теория автоматического управления. М.: Издательство МЭИ, 2004.*

Использование электропроводности для контроля за концентрацией фосфатов в котловой воде.

Студент ТФ-05-04 Тянь И.А.

Руководитель: д.т.н., профессор Петрова Т.И.

На тепловых электростанциях с барабанными котлами для обработки котловой воды используются натриевые соли фосфорной кислоты. Фосфатирование котловой воды производится для решения двух проблем: снижения образования отложений в котле и поддержание рН на требуемом нормами уровне. Несмотря на большой опыт эксплуатации котлов при фосфатном водном режиме на многих электростанциях имеются проблемы при его реализации, а именно: хайд-аут фосфатов при изменении нагрузки; образование отложений, содержащих фосфаты, на теплопередающих поверхностях; кислотно-фосфатная коррозия и водородное охрупчивание металла.

В реальных условиях отмечаются технологические трудности при дозировании фосфатов, в частности, неравномерность распределения фосфатов в объеме котловой воды.

Контроль за концентрацией фосфатов производится ручным методом, что не дает возможности оценить реальную концентрацию фосфатов в определенный момент времени и оперативно влиять на их содержание в котловой воде. Поэтому задача данной работы состояла в выборе параметра, который может изменяться в зависимости от концентрации фосфатов и который может измеряться непрерывно в автоматическом режиме.

Испытания проводились на барабанном котле ТП-87 ТЭЦ-22 ОАО «Мосэнерго» при постоянной нагрузке, давлении и продувке из барабанного котла; в котловую воду дозировался раствор Na_3PO_4 . Получены зависимости между концентрацией фосфатов и электропроводностью и концентрацией фосфатов и рН котловой воды.

В результате математической обработки экспериментальных данных было получено, что зависимость удельной электропроводности от концентрации фосфатов в котловой воде является линейной и выражается следующими уравнениями:

для чистого отсека:

$$\chi_{\text{ч.о.}} = 5,285 C_{\text{PO}_4^{3-}}^{0,95} + 1,286$$

(1)

для соленого отсека:

$$\chi_{\text{с.о.}} = 9,501 C_{\text{PO}_4^{3-}}^{0,8} - 4,881$$

(2)

С практической точки зрения для регулирования дозирования фосфатов целесообразно использовать зависимость (1), т.к. дозирование фосфатов производится в чистый отсек. Полученные зависимости позволяют разработать систему автоматического дозирования фосфатов в котловую воду и осуществлять контроль за их содержанием.

В дальнейшем предполагается установить функциональную зависимость между концентрацией фосфатов и удельной электропроводностью и рН при изменении нагрузки котла, на основании которой можно разработать схему автоматического дозирования фосфатов при изменении рабочих параметров котла.

Эту работу предполагается выполнить на том же котле.

Полная автоматизация вычислений с помощью формулы Мейсона

Усенко В.В.

Московский энергетический институт (технический университет)

Аннотация

Предлагается несколько типов вновь разработанных матриц и матричных операций, на базе которых проводится матрицирование формулы Мейсона. Это позволило разработать инструмент реализации формализованного решения сигнальных графов без ограничений на их размерность.

Предложен матричный вариант реализации формулы Мейсона для вычисления передаточных коэффициентов и представления передаточных функций в символьном виде.

Введение

Более полувека существует универсальная топологическая формула (УТФ) или формула Мейсона [1]. Весь этот период она привлекала внимание исследователей в самых различных (если не во всех) отраслях науки и техники. УТФ и сегодня манит кажущимся легким формализованным решением линейных алгебраических и дифференциальных уравнений без ограничений на их порядок.

$$W_{ij}(s) = \frac{\sum_{k=1}^n P_k(s) \cdot \Delta_k(s)}{\Delta(s)}, \quad (1)$$

где $X_i(s)$ - изображение сигнала в i -ой вершине-стоке СГ, соответствующий зависимой переменной; $X_j(s)$ - сигнал в j -й вершине-истоке СГ, соответствующий свободной переменной системы (ее вход); s - оператор Лапласа. Для простоты дальнейшего изложения оператор Лапласа опускается. $P_k(s)$ — передача k -го прямого пути СГ от j -го входа к i -му выходу системы; n — число прямых путей СГ от j -го входа к i -му выходу; $\Delta(s)$ - главный определитель СГ, которой рассчитывается по формуле

$$\Delta = 1 - \sum_i T_i(s) + (-1)^r \cdot \left[\sum_{i,j} T_i(s) \cdot T_j(s) + \sum_{i,j,k} T_i(s) \cdot T_j(s) \cdot T_k(s) + \dots + \right] \quad (2)$$

где $\sum T_i$ - сумма передач или передаточных функций контуров СГ. Далее $\sum T_i \cdot T_j$, $\sum T_i \cdot T_j \cdot T_k$, $\sum T_i \cdot T_j \cdot T_k \cdot \dots$, T_r - суммы произведений передач возможных комбинаций несмежных контуров по два, по три и т. д., до r -ой возможной комбинации несмежных контуров; $\Delta_k(s)$ - минор определителя графа, который не касается k -го пути.

Минор определителя графа Δ_k рекомендуется вычислять по (2) для подграфа, полученного из исходного графа, путем вычеркивания из графа информации о контурах, смежных k -му прямому пути.

Из описания УТФ следует, что ее применение рассчитано на использование ручного счета.

С появлением компьютера интерес к УТФ многократно увеличился, что связано с надеждами на формализованные решения с ее помощью, несмотря на то, что она не содержит конкретных указаний на выполнение этапов ее реализации. Более того, реально УТФ не является формулой в общепринятом смысле этого понятия. По сути, это гениальное описание пути следования к цели. Оно одновременно максимально лаконичное и весьма общее. Несмотря на общность формулы, в ней содержатся ясные указания на то, что нужно проделать, чтобы вычислить передаточный коэффициент или вывести передаточную функцию между заданными входом и выходом системы представленной графом. Однако как получить нужную информацию для наполнения формы УТФ неизвестно.

1. Постановка задачи

Анализ структуры вычислительных процедур УТФ показывает, что весь процесс ее решения можно разбить на два этапа. На первом (частично формализованном) извлекается структурная информация о системе и представляется булевыми матрицами. На втором этапе требуется приспособить эту информацию к вычислительным процедурам, требуемых структурой УТФ.

Первый этап заканчивается представлением структурной базовой информации в виде

четырёх булевых матриц: контуров C , путей P , парных касаний контуров $F2$ и матрицей касаний путей с контурами E [2,3]. Среди них матрица парных касаний контуров $F2$ в явном виде не содержит информации о касаниях контуров выше двух и к непосредственным вычислениям заведомо не приспособлена. Она является лишь основой для извлечения такой информации, однако форма представления всей информации о касаниях контуров неизвестна, а алгоритмы идентификации касаний требуют существенной доработки, что является одной из целей данной статьи.

Следует отметить, что построение структурных базовых матриц (СБМ) контуров C , путей P и матрицы комбинаций несмежных контуров имеет принципиально алгоритмическую природу, следовательно, УТФ не была и не станет формулой в полном смысле этого слова. Ее можно создать при условии, что известна достоверная информация о СБМ или может быть рассчитана. В статье ставится именно эта цель, т.е. разрабатывается матричный вариант реализации УТФ и матричный способ диагностики ошибок в СБМ. Для ее достижения потребуется:

1) адаптировать некоторые структурные матрицы, построенные алгоритмическим путем, к алгебраическим вычислениям или сконструировать гибридные матрицы, для которых имеет смысл применение как булевых, так и алгебраических операций.

2) разработать не типовые матричные операции, обращающие булевы матрицы в алгебраические и наоборот - алгебраические в булевы матрицы.

Параллельно с этим создаются методы проверки достоверности структурной информации, полученной алгоритмическим путем. Основой этих методов могут служить матричные взаимосвязи структуры систем.

2. Четыре разновидности матричных операций.

Булево произведение матриц. При разработке матричного варианта УТФ эта операция используется нами почти во всех формулах. Заметим, что булево произведение матриц, в каком виде оно существует сегодня, является наиболее неэффективной операций [4]. В нем все не так, начиная с названия. Легко убедиться, что после выполнения первой части операции умножения строк на столбцы, последующее сложением элементов не влияет на результат и, следовательно, лишено смысла.

Применительно к булевым матрицам результат, получаемый умножением матриц, можно получить многими путями, в отличие от алгебраического произведения, где оно незаменимо. Среди них особенно привлекателен алгоритм 4-х русских, где результат достигается без логических (алгебраических) умножений и сложений [3]. Вместо них переставляются строки матрицы B в результирующую матрицу C . Матрица A в этом случае служит лишь координатором перестановок.

Специфика «перестановочного умножения» особо наглядна, если матрица A содержит в каждом столбце по одной единице, рис.1. Реализация алгоритма 4-х русских в этом частном случае предельно проста. На рис.1 приведена 2-х столбцовая матрица a из строк, соответствующих индексам единичных элементов матрицы A . Они определяют порядок перестановок строк. Например, 1-я строка матрицы a показывает, что в 1-ю строку матрицы C следует переставить во 2-ю строку матрицы B .

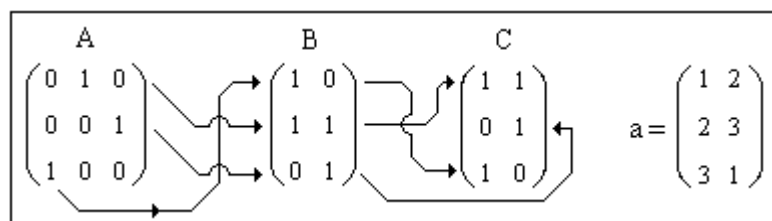


Рис.1.Алгоритм 4-х русских для умножения булевых матриц

Изменения содержания умножения булевых матриц приводят к многократному увеличению эффективности вычислений. Например, при умножении квадратных матриц порядка $n = 10$, объем вычислений уменьшается в десять раз. Создание методов подобных рис.1 способствуют осознанию того, что ориентация на традиционные каноны матричного аппарата может не только снижать эффективность достижения целей, но и затруднять их осмысление.

Семантика операции умножения $A \otimes B$ не соответствует ее содержанию. Ее сутью является конъюнкция матриц, определяемая как конъюнкция каждой строки матрицы A , с каждым столбцом матрицы B . Немаловажно и то, что она применима как к булевым, так и к алгебраическим матрицам. Числа неравные нулю в конъюнкции матриц воспринимаются как единицы.

Прямое произведение столбцов матриц, обозначается $A \bullet B$. Операция состоит в умножении каждого столбца матрицы A на каждый столбец матрицы B . Результаты операции размещаются в блочный вектор-столбец C .

С помощью прямого произведения столбцов становится возможным умножение алгебраического вектора на булеву матрицу, что преобразует ее в матрицу готовую к проведению непосредственных расчетов.

Перемножения ненулевые элементов векторов, строк матриц и блочных векторов, обозначается $\circ[M]$. Эта операция используется для определения передач контуров и путей, вычисления миноров и определителей систем уравнений.

Бинарное умножение матриц, обозначается $A * B$. Эта операция состоит из прямого произведения вектор - строки или матрицы A на каждую строку матрицы B . Затем перемножением ненулевых элементов в строках. Эквивалентом этой операции может быть комбинация предыдущих двух операций $\circ(A^T \bullet B^T)^T$, что требует при обращении к ней в 5 раз больше символов, чем в операции $A * B$.

3. Ввод исходной информации.

В качестве входной информации любой системы можно использовать только одну матрицу модификацию матрицы смежности Sw . В ней, в отличие от классической булевой матрицы смежности S , на место единиц вводятся передаточные коэффициенты или символы передаточных функций. Она легко перестраивается в булеву матрицу смежности S путем логического сложения или умножения матрицы Sw на себя. На основе матрицы Sw с помощью пользовательской функции $Adj(Sw, L)$ в зависимости от цели можно выводить семь различных векторов и матриц, включая вектор передач дуг A и информацию для построения булевых матриц контуров C и путей P . В свою очередь с их помощью и матрицы инцидентий H можно построить матрицу парных касаний контуров $F2$ и матрицу касаний контуров с путями E [2,3].

Как уже сказано вся исходная информация для построения любых структурных матриц берется из матрицы смежности. Другой матрицей определяющей структуру системы с точностью до изоморфизма, является матрица инцидентий H . Однако ее использование практически ограничивается проверкой правильности идентификации матрицы контуров.

Работа над матричным вариантом УТФ позволила выявить новые структурные свойства матрицы инцидентий H , позволяющие преобразовывать матрицы одного типа в другой. Например, матрицу контуров на дугах в матрицу контуров на вершинах

$$Z = (C \otimes H^T) \quad (3)$$

В свою очередь матрица Z определяет базовую матрицу парных касаний контуров $F2$

$$F2 = 1 - (Z \otimes Z^T) \quad (4)$$

Анализ содержания матричных соотношений УТФ показал, что большинство из них в явном или неявном виде зависят от матрицы инцидентий H . При определении матриц контуров Z и путей Lz на вершинах и проверке правильности построений СБМ она используется более 10 раз. Это показывает, что матрицы инцидентий H так же как матрица смежности Sw должны создаваться и вводиться в компьютер автономно. Затраты времени на ее ввод компенсируются новыми возможностями диагностики ошибок в вычислениях практически всех матриц, используемых в процессе матрицирования УТФ.

4. Матричная реализация главного определителя УТФ

После идентификации структурной информации в виде матриц путей C и контуров P , матрицы парных контуров касаний $F2$ и матрицы касаний путей с контурами E , задачу вычисления составляющих формулы (1) приходится решать сначала. Каким образом применить структурную информацию к вычислению составляющих формулы (1), указаний в УТФ не содержится и лишь матричная форма представления структурной информации связывает нас с идеей поиска решения в матричном виде.

Как видно из (2), вычисление множества сумм главного определителя может быть проведено после их индивидуализации элиминированием из них комбинаций смежных контуров. Матрица парных касаний контуров F_2 в явном виде не может быть использована для этих целей. Главная причина этого несоответствие ее формы структуре вычислений определителя (2), а не только отсутствие информации в явном виде о всех комбинациях касаниях контуров.

Образ матрицы всех комбинаций несмежных контуров (КНК) был найден благодаря обратному анализу структуры главного определителя графа (2), от конечной цели к исходным данным. Ставился вопрос, каким требованиям должна отвечать информация на предыдущем этапе, чтобы на последующем этапе ее можно было бы представить матрицами и получить решение в матричном виде и как вычислить суммы определителя одновременно?

Цепочка таких рассуждений позволила найти форму матрицы касаний всевозможных комбинаций контуров F . Число ее столбцов должно быть равным числу контуров системы p , а число строк – числу всевозможных комбинаций несмежных контуров от двух до p . Единичные элементы матрицы $F_{ij} = 1$ должны соответствовать индексам несмежных (некасающихся) контуров, в противном случае - $F_{ij} = 0$. Для вычисления содержания матрицы F разработан алгоритм, идея которого созвучна с известной задачей Рамсея о множестве попарно знакомых (незнакомых) людей [5]. Исходным материалом для построения булевой матрицы всех комбинаций несмежных контуров F служит матрица парных касаний F_2 .

В каждой строке этой матрицы единичные элементы $F_{ij} = 1$ указывают на индексы контуров, входящих в одну из множества комбинаций несмежных контуров, а элементы $F_{ij} = 0$ - на индексы контуров, не входящих ни в одну из КНК.

Если стремиться к созданию компактного выражения главного определителя, то сумму передач контуров системы $\sum T_i$ в (2) можно внести внутрь скобок к остальным суммам, начав отсчет r с единицы. Для учета этого изменения в (2) к матрице F присоединим сверху единичную матрицу I , что увеличит число ее строк на p . Теперь можно приступить к матрицированию главного определителя графа – замене множества сумм эквивалентным матричным выражением.

Матрица F в приведенном виде (4) полностью определяет структуру и раскрывается механизм вычислений главного определителя графа Δ . С ее помощью можно построить матрицу некасающихся дуг графа с контурами их комбинациями, т.е. извлечь информацию о дугах графа задействуемых в вычислении главного определителя

$$F_c = (F \otimes C) \quad (5)$$

Умножение вектора передач дуг A на эту матрицу есть вектор-столбец абсолютных значений передач контуров и произведений передач комбинаций несмежных контуров

$$T = A * (F \otimes C) \quad (6)$$

Последней трудностью для вычисления главного определителя является отрицательная единица с возрастающей степенью $(-1)^r$, чередующая знак перед суммами. Ее заменяем знаковым вектором из единиц размером равным длине вектора

$$J = 1 - 2 \cdot \text{mod}(F \cdot (F^T), 2), \quad (7)$$

где, если R – четное число, $\text{mod}(R, 2) = 0$ и если R – нечетное число, $\text{mod}(R, 2) = 1$.

Теперь формулу для главного определителя (2) заменяем матричным выражением:

$$\Delta = 1 + [A * (F \otimes C)]^T \cdot J \quad (8)$$

В нем структурным носителем информации о числе контуров и их комбинациях является матрица F . Она связывает числовую информацию о передачах дуг вектора A со структурной информацией, содержащейся в матрице контуров C и является основой матрицирования УТФ.

Свойство матрицы F . Если матрицу F разделить на подматрицы $f_1, f_2, \dots, f_k$, индексы которых равны их строчным рангам, то эти подматрицы обладают следующим свойством

$$(f_2^T \otimes f_2) \equiv (f_3^T \otimes f_3) \equiv \dots \equiv (f_k^T \otimes f_k) \equiv F_2 + f_1 \quad (9)$$

Это свойство используется для проверки правильности вычисления матрицы F .

5. Матричная реализация числителя УТФ

Для вычисления числителя УТФ требуется матрица путей P_{ij} на дугах графа от i -го входа к j -му выходу системы. Для простоты будем использовать только символ P , полагая, что индексы i и j заданы $P = P_{ij}$. Это упрощение относится и к матрицам L, E, X , индексы которых

определяются индексам матрицы P.

При формировании числителя УТФ матрица касаний путей с контурами системы

$$E = (L \otimes Z^T), \quad (10)$$

где L и Z соответственно матрица путей и матрица контуров на вершинах графа.

Важной для формирования числителя является связь матриц E и F со структуры частных определителей системы определяемой матрицей

$$X = E \otimes F^T \quad (12)$$

В матрице X число строк $\text{rows}(X) = \text{rows}(F)$, а число столбцов $\text{cols}(X) = \text{rows}(E)$. Если элемент матрицы $X_{i,j} = 1$ единичный, то i-ая комбинация контуров несмежная j-му пути участвует в вычислении j-го определителя. В альтернативном случае. $X_{i,j} = 0$ i-ая комбинация контуров на значение j-го определителя не влияет. Причем для этого не нужно создавать дополнительного инструмента элиминирования информации о контурах и их комбинациях из выражения главного определителя, как это рекомендовано в [1]. Эти операции реализуются матрицей X, которая своими нулевыми элементами, как фильтром не допускает к вычислениям частных определителей информацию о контурах, касающихся конкретных путей, фактически элиминирует их.

Таким образом, матрица X выполняет не только информационные функции, но и является инструментом конфигурирования определителей УТФ. Ее функция элиминирования требуемых контуров реализуются при выполнении следующей матричной операции

$$Tk = [A * (F \otimes C)] \bullet (\overline{F \otimes E^T}) \quad (13)$$

В матрице Tk каждый из k столбцов образован из вектора (6), в котором часть элементов по информации матрицы E обратились в нули.

После суммирования элементов вектора Tk с учетом знаков его составляющим получим выражение для расчета частных определителей

$$\Delta k = \{[A * (F \otimes C)] \bullet (\overline{F \otimes E^T})\}^T \cdot J + 1 \quad (14)$$

Наиболее простым при формировании числителя стало вычисление вектора передач путей

$$Pw = A * P \quad (15)$$

Если в (1) подставить (9), (14) и (15), то УТФ для вычисления передач между заданным входом и выходом системы принимает следующий вид

$$W_{ij} = (A * P)^T \cdot \frac{\{[A * (F \otimes C)] \bullet (\overline{F \otimes E^T})\}^T \cdot J + 1}{[A * (F \otimes C)]^T \cdot J + 1} \quad (16)$$

Формула (16) представлена в наиболее приемлемом виде для непосредственного расчета коэффициентов передачи, так как в ней отсутствуют промежуточные вектора или матрицы.

При необходимости ее можно записать в более компактном виде вплоть до (1).

Если в качестве результата требуется выражение для передаточной функции между заданными вершинами графа, то оно может быть представленным формулой в символьном виде.

Для сложных систем формулы передаточных функций весьма громоздки, поэтому три основные составляющие УТФ целесообразно выводить автономно в матрицах.

Для этих целей созданы три пользовательских функции: - 1) Denom_S(F) - возвращает строку из символов передаточных функций контуров и их произведений (знаменатель УТФ); 2) Minor_S(F,E) - возвращает вектор-столбец, элементы которого в символьном виде отображают передаточные функции и их произведения входящие в миноры УТФ; 3) Wput_S(P) - возвращает вектор-столбец, элементы которого в символьном виде отображают передаточные функции путей от заданного входа к заданному выходу системы.

Пример 1.

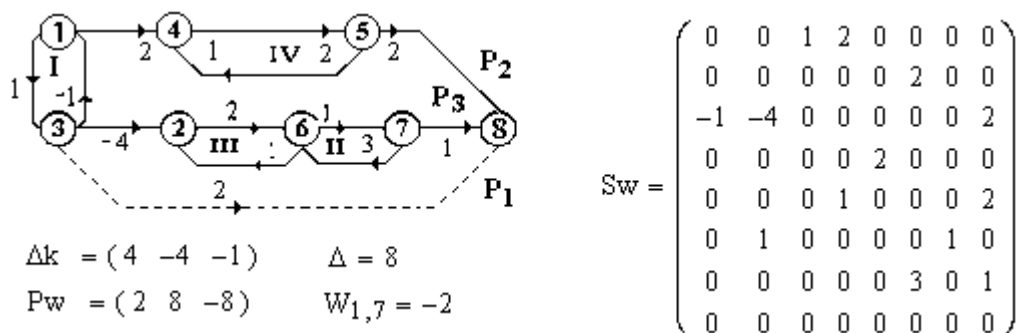
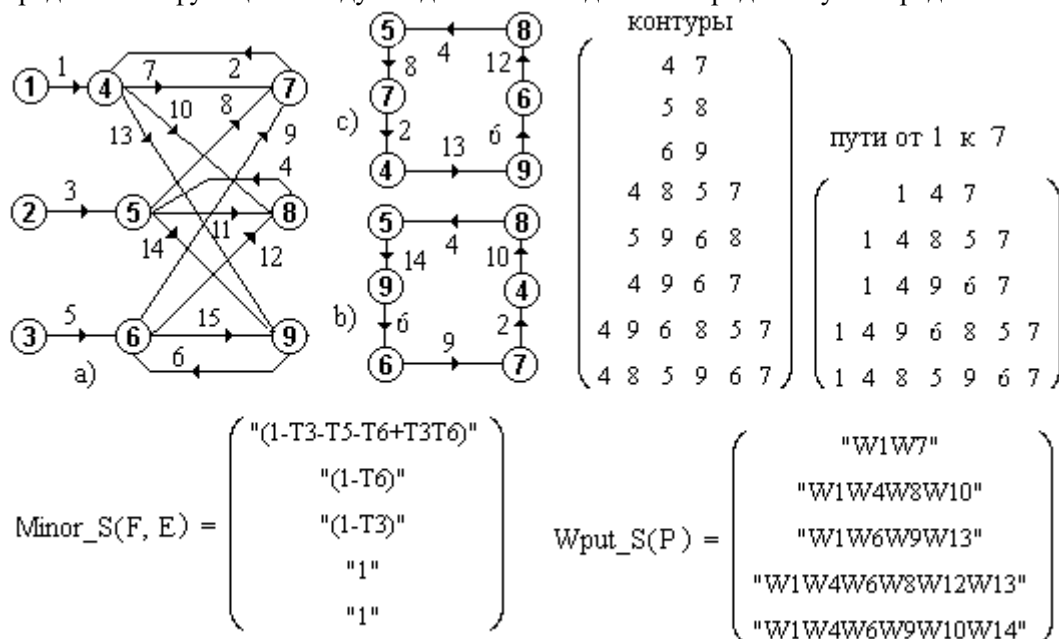


Рис.3 Граф системы из трех контуров, его матрица смежности и значение коэффициента передачи W между вершинами 1 и 7, а также его основных составляющих.

Пример 2. На рис.4 приведена структурная схема трех связной АСР и приведены составляющие передаточной функции между входом 1 и выходом 7. Передачи путей представлены сим-



$$\Delta = "(1-T1-T2-T3-T4-T5-T6-T7-T8+T1T3+T2T6+T3T6+T3T7+T1T5+T1T6-T1T3T6)"$$

Рис.4 Граф структурная схема трех связной АСР

волами передач дуг графа, а миноры и главный определитель графа символами передач контуров. Из выражений для записи передаточной функции видно, что 3-х связная система содержит восемь контуров, а в передаточные функции прямых каналов регулирования входит пять путей.

Список литературы

1. Mason S.J. Feedback theory - some properties of signal flow graphs. Proc. IRE, 1953. № 9.
2. Кафаров В.В., Усенко В.В., Мешалкин В.П. Формализованный метод анализа химико-технологических систем на основе применения сигнальных графов. Тр. АН СССР, №4, 1978
3. Усенко В.В. Алгоритмизация структурного анализа систем управления. М., МЭИ, 1988.
4. Усенко В.В. Единые методы эффективного оперирования булевыми и нечеткими матрицами и матричный сервис. Тр. Международной конференции CONTROL-2003, М., МЭИ, 1988
5. Ф.Харари, Теория графов. М., «Мир», 1973.

Алгоритм декомпозиции систем на подсистемы и его реализация

Усенко В.В.

Московский энергетический институт (технический университет)

Аннотация

В статье излагается метод декомпозиции многосвязных систем на подсистемы. Рассматриваются вопросы построения нечетких структурных схем объектов. Метод полностью формализован благодаря использованию матричного аппарата булевых алгебр. Предлагаются критерии, с помощью которых можно легко установить возможность (невозможность) декомпозиции систем на подсистемы.

1. Введение

Настоящее время характеризуется широким внедрением нечетких технологий в самые разнообразные сферы человеческой деятельности. Наиболее актуальным является их использование при управлении, многосвязными объектами, для которых, в первую очередь, и разрабатывалась нечеткая теория множеств. Однако, именно в этой области по некоторым причинам успехи наиболее скромные. Связано это в первую очередь с большой размерностью решаемых задач. В таких случаях при синтезе нечетких контроллеров используется каскадный принцип, когда система управления собирается в виде цепочек двухвходовых контроллеров, которые предполагается настраивать автономно [1,2]. Такой подход дает значительный эффект при синтезе нечетких контроллеров, база правил которых определяется большим числом входов. В многосвязных системах трудности управления проявляются в значительно большей степени, чем влияние размерности входного вектора. Это связано с наличием взаимовлияний между подсистемами, из которых состоит исходная система. Преодоление этих трудностей, как в четких, так и в нечетких многосвязных системах, приводит к необходимости использования информации полученной на основе их структурного анализа. В данной статье делается попытка преодоления указанных затруднений.

Проблема синтеза многосвязных нечетких систем вызвана не особенностями применения нечеткой методологии. В эту сферу она переключалась из области синтеза обычных (четких) систем управления, где также до конца не решена [6]. В нечеткой среде она лишь обострилась неопределенностью самого понятия структуры системы.

2. Нечеткие структуры

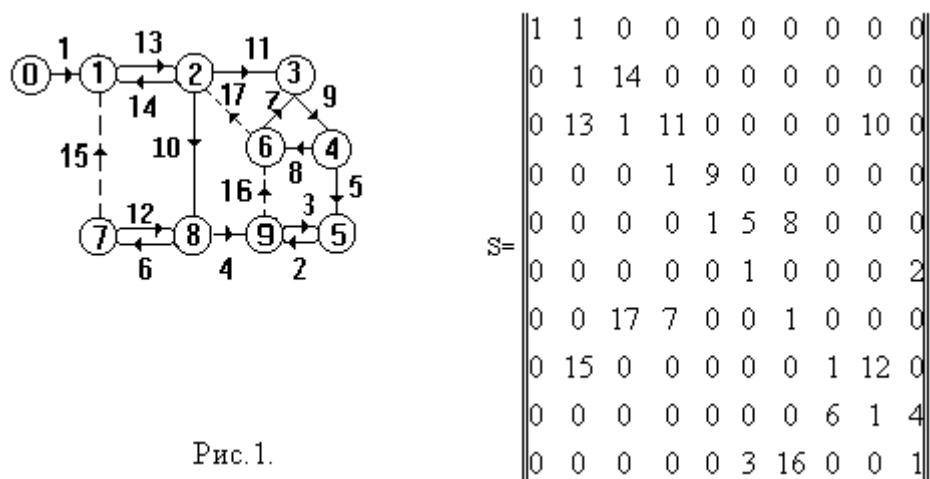
При традиционном подходе к построению и оптимизации систем автоматического регулирования, как правило, оснащенных обычными ПИД контроллерами, структура объекта считается вполне определенной, если не детерминированной. Обычно, при ссылках на структурные схемы их называют «упрощенными», полагая, что полная схема заняла бы много места. Однако, как полные, так и упрощенные структурные схемы, впрочем, как и любые другие схемы, является моделями объекта в той либо иной степени приближения, субъективно отражающих его реальные свойства, т.е. являются нечеткими категориями. Поэтому можно допустить, что для достижения одних и тех же целей может существовать несколько структур с разной или близкой степенью принадлежности $\mu(s)$ к нечеткому множеству структур.

Очевидно, что рассматривать нечеткую структуру, состоящую из четких каналов нелогично. Именно поэтому первичным является определение нечеткого канала управления. Так как четкая структура является частным случаем нечеткой структуры. Рассмотрим сам процесс формирования канала управления. Как известно, на любой параметр системы воздействует большое количество входных

переменных и лишь часть из них, с нашей точки наиболее существенных, включаются в структурную схему. При описании систем обычно используются выражения с нечетким смыслом, например, эта связь «сильная», «слабая» и другие. Для формализации подобных высказываний, введем способ их оценки в виде функции принадлежности i -го канала к одному из нечетких множеств с терминами типа «существенная связь», «слабая», «сомнительная» и другие. Тогда, в зависимости от целей составления структурной схемы, режимов работы системы, знаний субъекта и т.д., можно оценить степень принадлежности конкретного канала к нечеткому множеству «существенный канал». Все существенные каналы будут включаться в структурную схему со степенью принадлежности близкой к единице. Другие менее существенные каналы, степенью принадлежности меньше единицы, но больше $\mu(x)=0.5$ формируют другую структурную схему, анализ которой позволяет выявить их значимость. И, наконец, структурная схема, содержащая несущественные каналы, со степенью принадлежности менее $\mu(x)=0.5$ составляется для выявления тонких эффектов работы системы. В зависимости от степени принадлежности включенных в схему динамических каналов зависит объем работ, связанный с отладкой и оптимизацией системы управления. В данной работе показывается, что проведение структурного анализа системы позволяет провести декомпозицию исходной системы на подсистемы, что приводит к существенному уменьшению размерности решаемой задачи. В данном случае структурный анализ включает следующие этапы: идентификацию замкнутых контуров, исследование взаимовлияний контуров, декомпозицию многосвязной системы (если это возможно), установление соподчиненности подсистем и очередности их оптимизации. Все этапы проведения структурного анализа и декомпозиции систем на подсистемы формализованы.

3. Структурный анализ нечетких систем и их декомпозиция

Пусть требуется оптимизировать исходную нечеткую систему, состоящую из четырех одноконтурных подсистем с PID контроллерами. Соответствующий ей нечеткий сигнальный граф представлен на рис.1, где динамические каналы (1-14) имеют степень принадлежности к нечеткому множеству «существенных каналов» близкую к единице, а каналы 15-17 значительно меньше.



Для контраста рассмотрим два крайних случая, когда при анализе структуры каналы (15-17) учитываются и когда их нет.

С целью формализации процедур проведения структурного анализа исходной системы, составлена матрица смежности графа **S** (рис.1). В матрице **S** номера строк и номера столбцов соответствуют вершинам графа, а элементы матрицы представляют собой коды ветвей графа. Кроме того, в главную диагональ матрицы **S** искусственно введены единицы, что связано со спецификой используемого метода формализации.

С помощью программы «**Cont**» идентифицируем замкнутые контуры системы при учете связей 15-17.

В матрице контуров **C** номера столбцов соответствуют кодам вершин графа, а номера строк соответствуют номерам идентифицированных контуров. Единичные

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

элементы матрицы указывают на номера вершин принадлежащих соответствующим контурам графа. Прежде всего, выясним вопрос о возможности декомпозиции системы на подсистемы. Это можно сделать двумя способами. В одном из них используется матрица пересечений **W**. Она вычисляется следующим образом:

$$W = R \otimes R^T, \quad (2)$$

где $\otimes$ - символ прямого умножения; T – символ транспонирования; **R** – матрица достижимостей, в ней элемент $r_{ij}=1$, если между вершинами i и j существует хотя бы один путь и $r_{ij}=0$, в противном случае.

В свою очередь, матрица достижимостей **R** вычисляется с помощью соотношения:

$$R = S^2 + S^3 + \dots + S^n = U \cdot S^n \quad (3)$$

Здесь **U** - символ логического суммирования степенных матриц по **n**.

В Mathcad матрица пересечений **W** вычисляется с помощью следующей записи

$$W \leftarrow R \cdot R^T \quad (4)$$

Здесь $\leftarrow$ символ присваивания, $\longrightarrow$ символ векторизации.

Вид матрицы пересечений **W** может служить критерием, с помощью которого можно выяснить вопрос о декомпозируемости системы на подсистемы. Если все ее элементы тождественно равны единице, то исходная система не может быть декомпозированной, в противном случае такая возможность имеется. В данном случае при учете связей 15-17 все элементы матрицы пересечений **W** равны единице, следовательно, система не декомпозируется. Полученный результат показывает, что ни одну из четырех систем нельзя настраивать индивидуально. Это требует рассмотрения всех четырех составляющих системы как одно целое. Если в каждой из подсистем требуется настраивать PID контроллер, то для того чтобы оптимизировать исходную систему потребуются варьировать одновременно 12-ю параметрами настройки.

К этому результату можно прийти и другим путем, например с помощью расчета матрицы взаимовлияний контуров :

$$\mathbf{F}=(\mathbf{C} \cdot \mathbf{C}^T)^n. \quad (5)$$

В этой матрице строки и столбцы соответствуют номерам контуров системы, элемент матрицы $f_{i,j}=1$, если между контурами существует взаимное влияние и $f_{i,j}=0$, в противном случае. В данном случае матрица взаимовлияний $\mathbf{F}$, как и матрица пересечений $\mathbf{W}$ тождественно равна единице, что указывает на взаимовлияния всех контуров друг на друга, в чем легко убедиться при непосредственном рассмотрении графа рис.1.

Проведем теперь структурный анализ системы без учета связей 15-17. Степень принадлежности этой структуры к нечеткому множеству «полная структурная схема» $\mu(x) \approx 0.5$, а степень принадлежности к нечеткому множеству «структурная схема с существенными связями» $\mu(x) \approx 1$. Как и ранее, вычислим матрицу контуров:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Как видно из сравнения матриц контуров (1) и (6), число контуров в системе уменьшилось в 2.5 раза, что свидетельствует о качественном изменении структуры. Вычислим матрицу взаимосвязей контуров $\mathbf{F}$. В данном случае она равна единичной матрице $\mathbf{F}=\mathbf{0}$, что свидетельствует о возможности декомпозирования системы. Теперь проведем декомпозицию системы на подсистемы. Для этого вычислим матрицы достижимости $\mathbf{R}$, контрдостижимости $\mathbf{R}^T$ и матрицу пересечений $\mathbf{W}$. После удаления из матрицы пересечений $\mathbf{W}$ одинаковых строк, которые указывают на одну и ту же подсистему, получим окончательно матрицу подсистем:

$$\mathbf{V} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (7)$$

В этой матрице строки соответствуют номерам подсистем, из которых состоит исходная система, а столбцы – номерам вершин графа рис. 1. Элементы матрицы отличные от нуля $v_{i,j}=1$ указывают на номера вершин, входящих в ту или иную подсистему. Из рассмотрения матрицы $\mathbf{V}$ видно, что исходная система состоит из четырех подсистем: 1-я включает в себя вершины 7 и 8; 2-я – вершины 3, 4 и 6; и т.д. На основе информации, содержащейся в матрице подсистем $\mathbf{V}$ и матрице смежности $\mathbf{S}$, построим конденсацию графа [3]. Конденсация системы без учета связей 15-17 изображена на рис.2а, где

	Рис.2а	Рис.2б	Рис.2с	Рис.2д	Рис.2е
Коды дуг	-	15	17	15,17	15-17
$\mu(s)$	0.5	0.6	0.7	0.8	1
Количество подсистем	4	3	3	2	1
Максимальное число степеней свободы	3	6	6	6	12

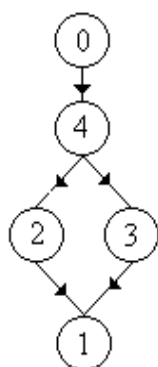


Рис. 2а

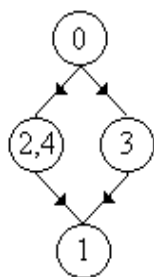


Рис. 2б

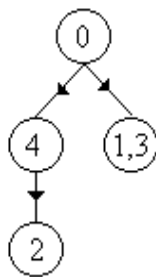


Рис. 2с

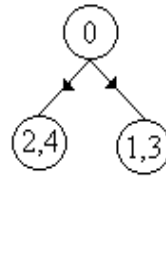


Рис. 2д



Рис. 2е

номера вершин соответствуют номерам подсистем. По конденсации структуры можно определить не только связи между подсистемами, но и установить очередность настройки и оптимизации подсистем. В данном случае подсистемы должны настраиваться, или рассчитываться в следующей последовательности. В первую очередь подсистема №4, затем подсистемы №2 и №3 и последней – подсистема №1. Любое изменение указанного порядка расчета подсистем ведет к непроизводительным затратам. Учет какой-либо новой связи в структуре или удаление из неё прежней связи ведет к изменению степени принадлежности структуры $\mu(s)$ и вновь требует проведения структурного анализа системы и её декомпозиции. В таблице и на рис.2 приведены некоторые варианты декомпозиции исходной нечеткой системы на подсистемы. Откуда можно увидеть, что в зависимости от степени принадлежности структурной схемы, изменяется число настраиваемых параметров системы от 3 до 12, а так же изменяется очередность настройки подсистем. Наибольшее затруднения вызывает вариант, когда исходная система не может быть декомпозированной рис.2е. что требует вариации 12-и параметров. Для уменьшения размерности задачи необходимо привести исходную систему к виду, когда система может быть декомпозированной. Например, если в рассматриваемом примере связями 15-17 нельзя пренебречь, т.е. они имеют функцию принадлежности $\mu(x) \approx 1$ нечеткого множества «существенных каналов», то их необходимо компенсировать путем синтеза параллельных нечетких каналов с противоположными знаками.

4. Заключение

В статье приведен матричный метод структурного анализа для четких и нечетких систем. Он весьма прост в реализации и полностью формализован. Использование нечетких контроллеров не решает проблемы оптимизации многосвязных систем, а лишь позволяет свести задачи большой размерности к нескольким задачам меньшей размерности.

Исследования показали, что настройка многосвязных систем требует предварительного проведения их структурного анализа, в результате которого устанавливаются взаимосвязи подсистем, проводится декомпозиция и устанавливается последовательность настройки подсистем. Радикальный путем уменьшения размерности решаемых задач является декомпозиция исходной системы на

подсистемы. Если это не удастся, то необходимо синтезировать статические или динамические каналы с целью компенсации «вредных» связей.

Литература:

1. Hampel R., Chacker N., Structure analysis for fuzzy-controller. Proc. of FUZZY'96, 1996, Zittau, Germany.
2. Petr Pivoňka, Marek Brejl. Use of fuzzy PID controllers in fuzzy control of coal Power Plants. Proc. of FUZZY'96, 1996, Zittau, Germany.
3. Usenko V.V. Formalisation of the structural analysis at synthesis of a control information system., PROC 6-th Fuzzy-Colloquium IPM Hochschule, 1998 p.50-55.
4. M.Mizumoto. Realisation of PID controls by fuzzy control method. Fuzzy Sets and Systems 70 (1995) p.171-182.
5. E.Arakeljan, V.Usenko, M.Panko. Fuzzy approach to formalisation of creating the base of human operator activity. Proc. 6-th Zittau Fuzzy-Colloquium, 1997, p.88-91.
6. V.Rotach. On Connection between Traditional and Fuzzy PID Regulators, PROC. 6-th Zittau Fuzzy- Colloquium, 1998, p.86-90.

Оптимальное управление работы КЭС в современных условиях

*Е.В. Ушакова, асп.; рук.. Э.К. Аракелян, д. т. н., проф., С.В. Мезин, к. т. н., доц.
(МЭИ (ТУ))*

Московский энергетический институт

Развитие современной энергетики и энергетических установок связано с созданием крупных энергетических объединений, включающих не только электроэнергетические, но и теплоэнергетические объекты. Укрупнение энергосистем способствует повышению надежности энергоснабжения и снижению затрат на производство энергии.

Отсутствие возможности складирования выработанной энергии приводит к необходимости переменной загрузки энергетического оборудования, зависящей от потребления соответствующего вида энергии. Это предопределяет работу значительной части теплоэнергетических установок в переменных режимах, включающих работу на пониженных нагрузках, полную остановку части энергоблоков в ночные часы и их перегрузку в периоды максимума. При переводе агрегатов с одного режима работы на другой изменяются гидравлические, температурные и другие параметры оборудования, которые влияют не только на экономичность, но и на надежность работы оборудования, а также на экологические характеристики. Поэтому одной из важнейших проблем энергетики является проблема наиболее эффективного покрытия переменной части графика нагрузок, обеспечивающего наименьший расход топлива и других средств в энергосистеме, без риска для работы оборудования. [1]

Создание оптовых рынков электроэнергии и мощности ставит проблему выбора генерирующего оборудования и оптимального распределения нагрузки между агрегатами на новый уровень, а именно планирование на сутки вперед и оперативное управление режимами работы при заданном графике и составе генерирующего оборудования. [2]

Для участия в ОРМ необходимо прогнозировать выдаваемую мощность на сутки вперед. Выбор состава генерирующего оборудования определяется за четыре дня до операционных суток с учетом фактора надежности. Станция согласовывает с системным оператором все длительные остановки: остановки на техническое обслуживание, ремонты и т.д., и выдает состав генерирующего оборудования на расчетный период. Системный оператор (СО) обрабатывает данные и передает состав ГО и все ограничения: по суммарной нагрузке, по надежности и т.д. За два дня до операционных суток станция через СО дает предложение по мощности для ГТП (группа точек подстанций). Администратор торговой сети (АТС) получает от СО актуализированную расчетную модель. АТС организует рынок ОРМ. АТС обрабатывается информация, полученная от СО и участников оптового рынка, и формируются входные данные для проведения конкурентного отбора и определения планового почасового производства и потребления участников оптового рынка. Определяются отдельно для каждой ценовой зоны почасовые равновесные цены на электрическую энергию и объемы электрической энергии, включаемые в плановое почасовое производство и потребление участников оптового рынка. СО формируется диспетчерский график по равновесным точкам. Излишки предложения поступают на Балансовый рынок.

Оптимизация проводится на трех этапах. Первое оптимальное распределение проводится при подготовке предложения на рынок за два дня до операционных суток. За день проводится уточняющая оптимизация для подготовки к участию в БР. Далее проводится дооптимизация с учетом данных, сформированных по БР.

С учетом указанных условий работы электростанций нами разработан программный комплекс по оптимальному распределению электрической нагрузки между генерирующими единицами конденсационной электростанции с учетом факторов экономичности и экологии при заданном составе генерирующего оборудования. Суть методики заключается в следующем:

- на первом шаге проводится оптимальное распределение электрической нагрузки по каждому ГТП и станции в целом и отбираются варианты, обеспечивающие в определенном интервале минимум расхода или затрат на топливо (при сжигании двух видов топлива);
- на втором шаге рассчитываются выбросы с дымовыми газами и выбирается ряд вариантов с наименьшими выбросами.

Конечный выбор остается за оперативным персоналом, который с учетом реальных условий станции из оставшихся вариантов отбирает наиболее подходящий для реализации.

Ограничение по расходу газового топлива и увеличение доли мазута, что однозначно приводит к росту выбросов, а также большая разница в их цене делают поставленную задачу особенно актуальной при совместном их сжигании, поэтому продолжение работы связано с разработкой ПК в указанных условиях и их внедрением на Ириклинской ГРЭС.

Литература

1. **Аракелян Э.К., Пикина Г.А.** Оптимизация и оптимальное управление: Учебное пособие / Под ред. Т.Е. Щедркиной. – М.: Издательство МЭИ, 2003.
2. **Постановление** Правительства РФ от 12 июля 1996 г. N 793 "О федеральном (общероссийском) оптовом рынке электрической энергии (мощности)" (с изменениями от 16, 18 ноября 1996 г., 28 августа 1997 г., 13 октября, 10 декабря 1999 г., 28 января 2002 г., 30 декабря 2003 г.)

Создание автоматической системы расчета ТЭП

Черняев А.Н.

В настоящее время большинство ТЭС в той или иной степени оснащены современными АСУТП блоков, что позволяет контролировать параметры, собирать данные о происходящих процессах. Для оценки работы станции необходимо по собранным данным рассчитывать технико-экономические показатели (ТЭП). Получение данных из АСУТП и ввод их в другую программу или получение их пользователем для дальнейшей обработки является узким местом в расчете ТЭП. На большинстве ТЭС инженеры вручную списывают показания приборов, передают их в производственно-технологический отдел, сотрудники которого производят расчет ТЭП.

Для решения задачи автоматической системы расчета ТЭП необходимо создать программу, способную автоматически собирать данные с контроллеров или БД АСУТП, производить расчет ТЭП с заполнением бланков соответствующей отчетности, осуществлять передачу отчетности или данных ТЭП на верхний уровень, т.е. на уровень АСУП. Современные БД и протоколы сетевого обмена, такие как ТСР/ІР, способны получать данные в программу расчета ТЭП. Также необходимо организовать сбор статистики и резервирование данных. Обязательным условием успешной реализации данного комплекса является адаптация программы для конкретной ТЭС. Простота адаптации может обеспечить возможность установки программы сотрудниками ТЭС без какого-либо сопровождения.

Создание программы по расчету ТЭП позволит:

- существенно сократить время получения данных сотрудниками ПТО, что позволит вовремя реагировать на изменения режима работы оборудования;
- снизить практически до нуля участие человека в расчете ТЭП, что исключит человеческий фактор, т.е. ошибки в расчетах, и ускорит время расчета;
- уменьшить время реагирования на изменение режима работы оборудования, что позволит корректировать настройки параметров с учетом максимального экономического эффекта;
- автоматически отсылать часть данных в другие отделы и в АСУП;
- формировать автоматизированные отчеты для вышестоящих организаций, что позволит более оперативно отправлять данные.

Все эти факторы в итоге существенно облегчат формирование форм отчетности и снизят нагрузку на инженеров ПТО. Уменьшится время реагирования на изменение режимов работы оборудования. Все перечисленные выше факторы приведут к увеличению экономического эффекта работы оборудования.

Разработка единой структуры управления энергетическим предприятием

В.А.Шмелев

Московский энергетический институт

Рациональное управление современным предприятием - это сложная задача, на эффективное решение которой влияют многие организационные и технические факторы. К основным факторам, влияющим на решение этой задачи можно отнести:

- Долгосрочное и оперативное планирование
- Отслеживание продукции в производстве
- Контроль технологических режимов
- Оптимизация складов
- Снабжение и сбыт
- Ведение планово-предупредительных ремонтов оборудования и другие факторы.

В настоящее время в сфере электроэнергетики предприятия разделены по направлениям деятельности (горизонтальная схема) в отличие от вертикальной схемы, когда компании РАО ЕЭС делились по региональному признаку.

Подобный подход к структуре электроэнергетики создает необходимость внедрения новых технологий, непосредственно обеспечивающих функционирование рынка электроэнергии, и систем повышающих эффективность бизнес-процессов энергетических предприятий, так как все они начинают работать на открытом рынке.

Предложен новый подход к построению АСУП. В отличие от традиционных методов предлагается использовать открытые системы, учитывающие ряд дополнительных факторов, что позволит корректно и эффективно решать стратегические задачи управления потоками информации на уровне АСУП и АСУ ТП в форме электронных документов.

Очевидно, глубокое внедрение систем управления на различных уровнях предприятия позволяет в значительной мере оптимизировать бизнес-процессы и сократить время на принятие решений. Однако на сегодняшний день значительное внимание уделяется автоматизации АСУ ТП, в то время, как верхний уровень автоматизации фактически отделен от нижнего в информационном плане.

На сегодняшний день проведена достаточно большая работа по созданию АСУП, состоящей целиком из открытых компонент, в частности, достаточно подробно проработана методология построения таких систем и реализованы отдельные ее функциональные подсистемы. Однако существует ряд проблем, решение которых представляет достаточно непростую задачу. Например, сегодня на рынке энергетики полностью отсутствует оборудование с открытыми спецификациями, а также соответствующее программное обеспечение. С другой стороны, открытые инструменты проектирования таких открытых систем также практически отсутствуют, как отсутствует и понимание необходимости создания таких инструментов.

Естественно, задачу подобного масштаба невозможно решить в рамках одного конкретного исследования, поэтому также стоит задача объединения независимых специалистов для разработки полноценной полностью открытой системы АСУ П и АСУ ТП, а также оборудования. Подобная система позволит значительно снизить издержки на лицензионные отчисления, а также избавиться от недостатков, присущих закрытым продуктам. Для реализации предложенного проекта на конкретном технологическом объекте необходимо дальнейшее исследование данного подхода, объединяющего АСУП и АСУ ТП в целостную структуру на основе единого открытого интерфейса, что позволяет минимизировать профессиональные риски (человеческий фактор) при ведении различных видов учета и составления отчетности, обеспечивает возможность перехода на качественно новую ступень организации бухгалтерского (финансового) учета в соответствии с МСФО.

РАЗВИТИЕ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТАМИ СОЗДАНИЯ ТЭС НА БАЗЕ БЛОКОВ ПГУ

Шныров Е.Ю.

ПРЕДМЕТ РАЗРАБОТКИ

Создание типовых программно-технических моделей подготовки и реализации проектов строительства ТЭС различной мощности на базе блоков ПГУ от момента формирования инвестиционного замысла до пуска объекта в коммерческую эксплуатацию.

АКТУАЛЬНОСТЬ

В 2008 г. в электроэнергетической отрасли начата реализация масштабной программы ввода новых/замены существующих энерго мощностей - «ГОЭЛРО-2». Согласно генеральной схемы размещения энерго мощностей в ближайшие 10 лет должно быть введено в эксплуатацию не менее 90 энергоблоков ПГУ мощностью от 110 до 450 МВт. К настоящему моменту уже инициировано строительство порядка 45 энергоблоков (заключены договоры генерального подряда/строительства «под ключ»).

Опыт реализации первых проектов в 2006-2007 гг демонстрирует наличие существенных затруднений с исполнением сроков строительства, влекущих за собой значительное увеличение стоимости объектов. Одной из главных причин возникновения такой ситуации является низкое качество подготовки, планирования и оперативного управления процессами проектирования и строительства ТЭС, как со стороны генеральных подрядчиков, так и со стороны заказчиков.

Необходимость решать указанные выше проблемы создаёт потребность в типовых моделях, позволяющих организовать эффективное управление инвестиционно-строительным процессом создания ТЭС в «большой» энергетике.

ДОСТИГНУТЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С 2004 года в рамках реализации настоящего проекта были разработаны:

- ✓ Системы планирования и оперативного управления строительством ТЭС на базе блоков ПГУ единичной мощностью 60-110 МВт включающие:
 - Детальные календарно-сетевые планы в программном комплексе управления проектами PRIMAVERA PROJECT MANAGEMENT, увязывающие процессы выдачи проектной документации, изготовления оборудования и строительства;
 - Свод организационных регламентов, инструкций по управлению проектом, организационному устройству.

- ✓ СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ В ФОРМЕ ИЕРАРХИЧЕСКИ-ОРГАНИЗОВАННЫХ ТАБЛИЦ, ПОЗВОЛЯЮЩАЯ НА ОСНОВАНИИ КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ ГЛАВНОГО КОРПУСА И ГЕНПЛАНА НА 95-97% СФОРМИРОВАТЬ ПОЛНЫЙ ПЕРЕЧЕНЬ КОМПЛЕКТОВ РАБОЧЕЙ ДОКУМЕНТАЦИИ, ПОДЛЕЖАЩИХ ВЫПУСКУ ДЛЯ ТЭС НА БАЗЕ БЛОКОВ ПГУ.

НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

Исходя из состава актуальных задач, перспективными направлениями развития проекта являются:

- ✓ РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ПЛАНИРОВАНИЯ И ОПЕРАТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СТРОИТЕЛЬСТВОМ ТЭС НА БАЗЕ БЛОКОВ ПГУ ЕДИНИЧНОЙ МОЩНОСТЬЮ 400 – 450 МВт СТАНДАРТНОГО И ОДНОВАЛЬНОГО ИСПОЛНЕНИЙ.
- ✓ ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМЫ КАЛЕНДАРНО-СЕТЕВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ТЭС С СИСТЕМАМИ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЕМ PDMS И 3D-ПРОЕКТИРОВАНИЯ.

В ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СФЕРЕ

- ✓ РАЗРАБОТКА ДЛЯ СТУДЕНТОВ ПРОФИЛЬНЫХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ УЧЕБНОГО КУРСА «УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТОМ СОЗДАНИЯ ТЭС».