



АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ CONTROL-2025

V Международная
научно-практическая
конференция

Сборник материалов

18 марта 2025 года

МОСКВА

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МЭИ»



**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ
CONTROL-2025**

V Международная научно-практическая конференция

18 марта 2025 года

Сборник материалов конференции

Москва
Издательство МЭИ
2025

УДК 681.5
ББК 32.966
А 18

Подготовлено на кафедре АСУТП

А 18 Автоматизированные системы управления технологическими процессами.
Control-2025: V Международная научно-практическая конференция (18 марта
2025 г., Москва); сборник материалов. – М.: Издательство МЭИ, 2025. – 76 с.

ISBN 978-5-7046-3251-1

Сборник включает доклады, посвящённые современным тенденциям и инновационным решениям в области АСУ ТП, направленным на повышение надёжности и качества технологических процессов, снижение затрат и обеспечение безопасности. Особое внимание уделено освобождению персонала от трудоёмких и опасных операций.

Представляет интерес для научных работников, инженеров, аспирантов и студентов, занимающихся исследованиями и разработками в области автоматизации технологических процессов.

Издано в авторской редакции

**УДК 681.5
ББК 32.966**

Учебное издание

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ CONTROL-2025
V Международная научно-практическая конференция**

18 марта 2025 года

Сборник материалов конференции

Компьютерная верстка З.Х. Айнетдиновой

Подписано в печать 20.09.2025.
Печ. л. 4,75

Тираж 21 экз.

Печать ризография
Изд. № 25н-087

Формат 60×84/16
Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в РИО НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14.
Отпечатано в типографии НИУ «МЭИ».
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 13.

ISBN 978-5-7046-3251-1

© Коллектив авторов, 2025

© Национальный исследовательский
университет «МЭИ», 2025

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ

Рогалев Николай Дмитриевич	ректор «НИУ «МЭИ», д.т.н., проф. – Председатель Оргкомитета
Комаров Иван Игоревич	проректор по науке и инновациям «НИУ «МЭИ», д.т.н. – зам. Председа- теля Оргкомитета
Дедов Алексей Викторович	директор Института тепловой атомной энергетики «НИУ «МЭИ», д.т.н., член-кор. РАН – зам. Председателя Оргкомитета
Мезин Сергей Витальевич	зав. каф. автоматизированных систем управления тепловыми процессами ИТАЭ «НИУ «МЭИ», к.т.н., доц. – зам. Председателя Оргкомитета
Гужов Сергей Вадимович	директор Центра подготовки и проф. переподготовки «Автоматизированные системы управления тепловыми про- цессами в энергетике и промышленно- сти», к.т.н, доц. – ответственный секре- тарь
Аракелян Эдик Койрунович	д.т.н, проф. каф. автоматизированных систем управления тепловыми процес- сами ИТАЭ «НИУ «МЭИ» – член Оргкомитета
Андрюшин Александр Васильевич	д.т.н, проф. каф. автоматизированных систем управления тепловыми процес- сами ИТАЭ «НИУ «МЭИ» – член Оргкомитета
Косой Анатолий Александрович	к.т.н., доц., зам. зав. каф. АСУ ТП по научной деятельности – член Оргкомитета
Грибова Юлия Николаевна	менеджер по работе с образователь- ными заведениями, ООО «Электроре- шения» – член Оргкомитета
Крылова Елена Владимировна	зам. директора ИТАЭ «НИУ «МЭИ» по учебной работе, к.п.н., доц. – член Оргкомитета

Содержание

<i>Э.К. Аракелян, Мезин С.В., Андрюшин А.В., Косой А.А., Красненко Д.М.</i> ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОСТИ АСУТП ТЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ.....	5
<i>А.И. Ретин, Е.А. Безуглов</i> ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ	16
<i>В.М. Парчевский</i> ЭКОНОМИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ АЭС И ВВЭР	22
<i>Ретин А.И., Е.А. Безуглов</i> TUNERID 2.0. ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ НАЛАДКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ	30
<i>Коньшев А.С.</i> РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ	37
<i>Лозбичева П.Н., Мерзлякина Е.И., Хоанг Ван Ва</i> О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАБОТЫ АСР С ТЕПЛОВЫМИ ОБЪЕКТАМИ	40
<i>Пикина Г.А., Косой А.А., Минькин А.А., Беляев В.П.</i> РАЗРАБОТКА НОНИУСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ЭНЕРГЕТИКИ	50
<i>Ю.С. Тверской, А.В. Голубев, Ю.А. Гайдина</i> О ПРОБЛЕМАХ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АСУТП ЭНЕРГОБЛОКОВ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	53
<i>Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев</i> О ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	61
<i>Шемякин А.О.</i> МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ БИБЛИОТЕК ДЛЯ СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ “АКСИОМА КОНТРОЛ”	70

*Аракелян Э.К., Мезин С.В., Андрюшин А.В., Косой А.А., Красненко Д.М.
Arakelyan E.K., Mezin S.V., Andryushin A.V., Kosoy A.A., Krasnenko D.M.*

ПОВЫШЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОСТИ АСУТП ТЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ¹

Increasing the intelligence of the TPP APCS with the use of digital technologies

Аннотация. В статье рассматриваются проблемы повышения интеллектуальности АСУТП на базе создания единой системы оптимального управления технологическими и производственными процессами во всех режимах работы оборудования, энергоблоков и станции в целом. Особое внимание уделено методу повышения интеллектуальности АСУТП, основанному на применении цифровой модели реальной станции, которая полностью описывает все технологические процессы производства энергии. В статье приведены основные результаты, которые были достигнуты в процессе работы над методиками и алгоритмами повышения интеллектуальности систем управления применительно к АСУТП тепловых электростанций различного типа, как на отдельных уровнях управления, так и по АСУТП станции в целом. В рамках представленного исследования приведены схемы технологических и интеграционных тренажеров, которые могут выполнять функции виртуального цифрового двойника. Предложены варианты использования тренажеров для выполнения исследовательских работ и различных задач АСУТП.

Ключевые слова: интеллектуальность АСУТП, цифровой двойник, электростанция, математическая модель, тренажер.

Abstract. The article deals with the problems of increasing the intelligence of ACSPP on the basis of creating a unified system of optimal control of technological and production processes in all modes of operation of

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

equipment, power units and the plant as a whole. Particular attention is paid to the method of increasing the intelligence of ACSPP based on the application of a digital model of a real plant, which fully describes all technological processes of energy production. The article summarizes the main results that were achieved in the process of working on methods and algorithms for increasing the intelligence of control systems as applied to the control systems of thermal power plants of different types, both at individual control levels and for the control system of the plant as a whole. Within the framework of the presented research the schemes of technological and integration simulators, which can fulfill the functions of a virtual digital twin, are given. The variants of using simulators to perform research work and various tasks of ACSPP are proposed.

Key words: ACS intelligence, digital twin, power plant, mathematical model, simulator.

Введение. Проблемы повышения интеллектуальности современных АСУТП сложных технологических объектов, в том числе тепловых и атомных электростанций, являются дискуссионными, а оценка степени интеллектуальности связана с их сложностью и разнообразием.

Очевидно, что уровень автоматизации (интеллектуальности) должен соответствовать техническому уровню высокоэффективных электростанций. С этой точки зрения современные АСУТП на базе ПТК в какой-то мере являются интеллектуальными системами с определенным уровнем интеллектуальности. Понятно так же, что чем выше степень развития технических средств управления, тем более высокий уровень интеллектуальности может быть достигнут за счет возможности реализации алгоритмов оптимального управления как на уровне энергоблоков, так и на уровне электростанции. Ситуация в современных АСУТП, построенных на базе ПТК, складывается так, что заложенные в ПТК широкие возможности программного и информационного обеспечения используются далеко не в полном объеме.

Исследования, проведенные в [1] по технико-экономической эффективности внедрения АСУТП на базе ПТК показали, что отсутствие в прикладном программном обеспечении алгоритмов оптимального управления приводит к тому, что сроки их окупаемости значительно превышают нормативную длительность жизненного цикла АСУТП.

Понятно так же, что при широком внедрении сложных оптимизационных алгоритмов ограниченные возможности человека-оператора не будут способствовать их эффективному использованию, и одной из наиболее важных задач при интеллектуализации процессов управления - освободить оператора от рутинной работы, оставляя за ним контроль за правильностью работы программных и технических средств. Как показал анализ техногенных аварий последних десятилетий, традиционные АСУТП не всегда способны обеспечить подготовку и принятие управленческих решений в условиях неопределенности поведения управляемого объекта и быстрого изменения его структуры. В этих условиях возникает резонный вопрос – достаточно ли достигнутый уровень интеллектуальности (автоматизации) и эффективности АСУТП на базе ПТК и что нужно делать на пути дальнейшего совершенствования систем управления сложными технологическими объектами, к которым относятся современные электростанции как на органическом, так и на других видах топлива.

Методы повышения интеллектуальности АСУТП. Современная АСУТП должна не только обеспечить управление объектами, но и стать «обучаемой». Такой принцип создания систем управления позволит спрогнозировать поведение объекта управления, гарантировать безопасность в случае нештатных ситуаций, когда действия оперативного персонала не всегда адекватны ситуации, а также будет основой для дальнейшего совершенствования технологии управления объектом.

Из известных четырех основных направлений исследования интеллектуальных технологий (системы, которые: (1) думают подобно людям; (2) действуют подобно людям; (3) думают рационально; (4) действуют рационально и оптимально) применительно к техническим системам особый интерес представляет 4-е направление. Именно с этих позиций в настоящем докладе рассматриваются проблемы повышения интеллектуальности АСУТП на базе создания единой системы оптимального управления технологическими и производственными процессами во всех режимах работы оборудования, энергоблоков и станции в целом.

Организационно ИАСУ представляет собой иерархическую систему с четким распределением выполняемых функций на каждом

уровне. На верхнем, станционном уровне структуры располагается основанная на знаниях организационная подсистема с функциями рас-суждения, планирования и решения оптимизационных задач с учетом внешних и внутренних текущих условий. Промежуточному уровню соответствует основанная на знаниях координационная подсистема, осуществляющая согласование по взаимодействию между верхним и нижним – блочным уровнями интеллектуализации, с функциями, направленными на планирование работы нижнего уровня. Самому нижнему уровню, исполнительному соответствует система управления аппаратными средствами, решающими сведенную к конкретным алгоритмам поставленную задачу с высокими требованиями к точности и функциями, которые базируются на методах теории автоматического управления.

Впервые в мировой практике разработана методика и алгоритм на ее основе по экспертной оценке уровня интеллектуальности систем управления применительно к АСУТП тепловых электростанций различного типа на органическом топливе как на отдельных уровнях управления, так и по АСУТП станции в целом. Для оценки уровня интеллектуальности введен условный термин «коэффициент интеллектуальности», определяемый для каждой функции или задачи, как отношение реализуемых на рассматриваемом временном этапе интеллектуальных технологий к целесообразному их числу применительно к рассматриваемой функции или задаче. Положительные отзывы на публикации авторов проекта по этой проблеме показывают перспективность этих исследований. Результаты проведенных расчетов по разработанному алгоритму позволили оценить степень повышения уровня интеллектуальности за счет внедрения комплекса оптимизационных задач, предлагаемых к реализации от исходного уровня 0,3-0,35 для традиционных ТЭС и 0,35-0,44 для электростанций на базе современных ПГУ до уровня соответственно 0,45-0,5 и 0,45-0,52 [2].

На основе этих исследований разработана методика выбора приоритетных для реализации функциональных задач станционного уровня в рамках интеллектуализации АСУТП на базе ПТК. Выделены критерии эффективности для возможности оценки очередности внедрения. Рассмотрена структурная схема модели конфигурирования и

расчета управления эффективностью Интеллектуальной АСУТП. Рассчитана оптимальная последовательность по реализации моделей в полном объеме, а также карта рангов при необходимости определения предпочтительной к реализации последовательности моделей функциональных задач в общем виде.

Решение этих задач на станционном уровне при сложном составе генерирующего оборудования связано с определенными сложностями, связанными с групповым управлением режимами работы энергоблоков, в том числе при решении данных задач программными средствами АСУТП на базе программно-технических комплексов. Обусловлено это тем, что современные ПТК как зарубежного, так и отечественного производства проектируются на управление технологическими процессами на блочном уровне. Переход на групповое управление, естественно, потребует определенных изменений в техническом и программном обеспечении АСУТП станции, что может привести к значительным затратам. Одним из инструментов по выполнению заявленных выше целей повышения интеллектуальности АСУТП современной электростанции является создание и использование цифровой модели и цифровой копии (двойника) реальной станции, которые полностью бы описывали все технологические процессы производства энергии. С помощью цифрового двойника можно будет подбирать состав генерирующего оборудования, провести оптимальное распределение текущей и прогнозируемой нагрузки, выбор оптимальных параметров работы различных установок, добиваться оптимизации производства с учетом всех факторов влияния. Отработка новых задач и повышение интеллектуальности АСУТП на цифровой копии реальной станции будут занимать значительно меньше временных, людских и финансовых ресурсов, и после проработки методик решения очередной группы задач по повышению уровня интеллектуализации на цифровой копии станции – процесс обратится, и уже с цифровой модели будут копировать технологические решения на реальную станцию. Тем самым подтягивая степень интеллектуализации АСУТП реальной станции до уровня виртуальной интеллектуализации АСУТП виртуальной станции, при условии, что цена очередного прироста степени интеллектуализации окажется меньше экономического эффекта от этого прироста.

Цифровая модель энергоблока представляет собой совокупность математических и компьютерных моделей и цифровой информации, необходимой для решения определенной задачи в системе автоматизированного управления и представленной в форме графиков, таблиц, регрессионных и балансовых уравнений, ограничений и т.д. Цифровые модели применительно к отдельным свойствам объекта/энергоблока, режимам его работы, энергетическим характеристикам позволяют повысить качество и эффективность проведения расчетов и принятия оптимальных решений.

Цифровой двойник энергоблока представляет собой систему, состоящую из цифровой модели энергоблока и двусторонних информационных связей. Цифровой двойник станции базируется на цифровых двойниках энергоблоков и двусторонних информационных связях по общестанционным коммуникациям.

В соответствии ГОСТ Р 57700.37-2021 цифровые модели и, соответственно, цифровые двойники изделия должны базироваться на полигонных испытаниях, проводимых квалифицированными специалистами.

Как показывает анализ существующих в технической литературе предложений по разработке цифровых моделей и цифровых двойников тепловых энергоблоков и электростанций наиболее сложным и трудоемким является моделирование систем управления.

При отсутствии возможности проведения экспериментальных исследований на реальных теплоэнергетических объектах предлагается использовать тренажерные модели и современные компьютерные тренажеры для получения исходной информации, необходимой для разработки цифровых моделей оборудования и режимов их работы. Помимо этого, при адекватных моделях технологических процессов и систем управления ими, тренажер, при соответствующем информационном обеспечении, может выполнять функции виртуального цифрового двойника.

На практике существует несколько типов компьютерных тренажеров, в том числе:

– технологический тренажер. Он предназначен для выполнения исследовательских работ, связанных с технологическим процессом

(исследование режимов на частичных нагрузках, при останове и пуске, изменение параметров и т.д.) [3-5]. Преимущества такого тренажера – возможность изменения масштаба времени (ускорение, замедление), фиксация промежуточных состояний с возможностью возврата и т.д. Упрощенная схема технологического тренажера представлена на рис. 1.

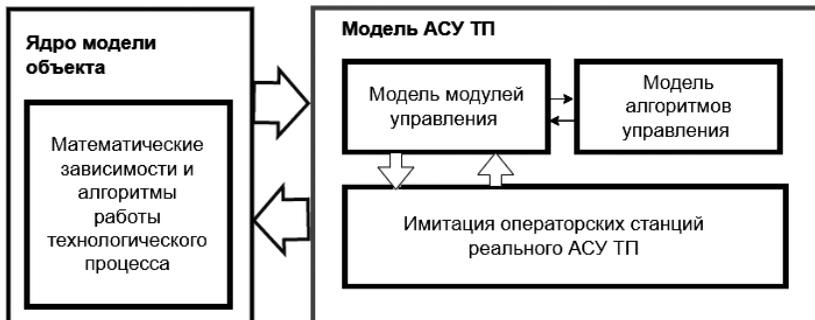


Рис. 1. Упрощенная схема технологического тренажера

Большинство существующих на данный момент технологических тренажеров разработаны для работы в автономном режиме. Это означает, что они никак не взаимодействуют с реальной АСУ ТП, которой оснащен моделируемый объект, т.е. тренажером управляет не АСУ ТП реального объекта, а управляет АСУ ТП модели объекта. Хотя в настоящее время большинство разработчиков тренажеров научились более или менее адекватно моделировать АСУ ТП, но тем не менее в большинстве тренажеров, даже базирующихся на аналитических моделях, АСУ ТП моделируется в сокращенном виде, в объеме, достаточном для управления несложными технологическими процессами. Вместе с тем, АСУ ТП – это своеобразная система, которая непрерывно развивается. По мере такого развития, базовый комплект поставки АСУ ТП также подвергается изменениям, а иногда и коренной перестройке. Как правило, такие изменения затрагивают только информационное и программное обеспечения АСУ, не касаясь аппаратуры (датчиков и исполнительных механизмов). Автономная модель объекта, моделирующая тот же самый технологический процесс, должна так же

претерпеть изменения синхронно или по крайней мере достаточно оперативно, с изменениями самого АСУ. В противном случае она уже не будет однозначно отражать поведение объекта и системы его управления.

– тренажер, в котором математическая модель интегрирована в эмулятор контроллера ПТК (далее «интегрированный тренажер»), что позволяет использовать возможности прикладного программного обеспечения ПТК в полном объеме, отображать режимы работы всего оборудования энергоблока максимально близко к действительным. Необходимое условие для создания такого тренажера – наличие эмулятора контроллера ПТК. В этом случае моделируется только сам объект, без средств управления им.

При этом модель объекта перестает быть автономным программным продуктом и становится неотъемлемой частью АСУ ТП. Для реализации такого подхода, модель объекта должна быть интегрирована в состав АСУТП, либо должна другими путями обеспечивать обмен информацией с АСУТП. Потеря автономности с лихвой окупается гибкостью и универсальностью модели. Как правило, технологический объект почти не претерпевает изменений в ходе своей эксплуатации. Поэтому модель объекта, имитирующая его, также не модифицируется, что позволяет сократить затраты на ее эксплуатацию в дальнейшем. То обстоятельство, что модель работает в паре с реальной АСУ ТП, позволяет исключить львиную долю затрат на разработку модели АСУ ТП и тем максимально самым удешевить ее [6, 7]. Упрощенная схема интеграционного тренажера представлена на рис. 2.

Основным же достоинством такого подхода является то, что любые изменения, происходящие в реальной АСУ, автоматически переносятся в модель без ее переделки. Кроме того, пользователи данной модели объекта даже могут не подозревать о том, что работают лишь с виртуальным прототипом реального объекта, так как весь интерфейс для их общения с объектом предоставляется средствами АСУ, которая фактически действует на операторской станции и с которой они уже имеют опыт работы.

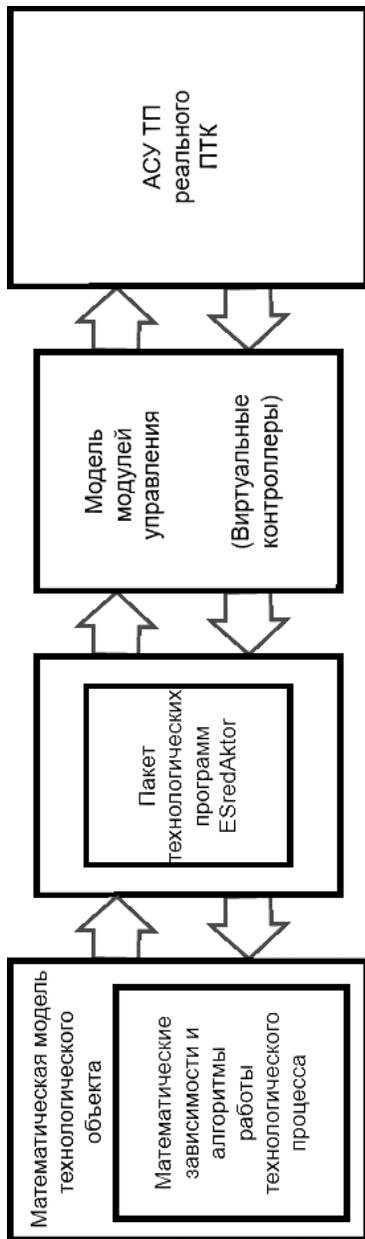


Рис. 2. Упрощенная схема интегрированного тренажера

Вместе с тем, с помощью данной модели объекта становится возможным произвести отладку АСУ ТП в ходе ее разработки или изменения для нужд объекта управления. При реализации такого подхода, АСУ ТП, так же, как и пользователи, не «догадывается» о том, что работает с виртуальным объектом. При этом виртуальный объект она воспринимает как его реальный прототип и соответственно адекватно реагирует на все изменения, происходящие в нем. Все проекты, отлаженные с использованием модели объекта, работающего в паре с реальной АСУ ТП, могут быть практически без изменений перенесены на реальный объект. При этом их отладка на 99% может быть выполнена на виртуальном полигоне.

Интегрированный тренажер, на базе которого работает АСУТП – для выполнения исследовательских работ, как и в технологическом тренажере плюс различные задачи по АСУТП (получение переходных характеристик, исследование динамических процессов и т.д.)

Преимущества – возможность использования всех прикладных программ ПТК и при хорошей модели технологического процесса – максимальное приближение к реальному объекту; возможность проведения реальных исследований и т.д.

Недостаток – отсутствие возможности замораживания определенной ситуации из-за работы АСУТП в непрерывном режиме.

Заключение. Учитывая приведенные выше особенности интегрированного тренажера, можно утверждать, что при адекватной цифровой модели энергоблока интегрированный компьютерный тренажер представляет собой аналог виртуального цифрового двойника энергоблока с АСУТП на базе ПТК. Основной сложностью при построении на их базе цифрового двойника станции является требование по организации двусторонней информационной связи между цифровыми двойниками энергоблоков и станции в целом. Возможным вариантом решения этой проблемы является создание централизованного информационного обеспечения на станционном уровне путем объединения контроллеров всех энергоблоков в едином центре управления с установкой центрального сервера соответствующей мощности, куда стекается вся необходимая информация от всех периферийных контроллеров энергоблоков и других источников информации. С этого же сервера вся необходимая информация для решения задач блочного и

станционного уровней управления поступает в сервер цифрового двойника станции. Такой подход к организации информационного обеспечения АСУТП позволит более рационально использовать технические и программные средства ПТК. Конечно, при этом возникает проблема сбора и обработки больших массивов информации и распределения этой информации по ее потребителям на энергоблоках.

Описание успешного опыта применения технологического тренажера производства ОАО «Тренажеры электростанций» для построения цифровой модели энергоблока ПГУ–450 и ее использование для решения оптимизационной задачи оптимального распределения электрической нагрузки ГТУ между газовыми турбинами с учетом технологических ограничений приведено в [8].

Доклад авторов, по результатам этих исследований – «Using a Computer Simulator to Create a Digital Model of a CCGT Power Unit» на «11th Symposium of Power and Energy Systems (CPES-2022) стал единственным докладом среди более 120 докладов из многих стран мира, который комиссией Международной Федерации автоматического управления (IFAC), после длительных обсуждений с участием всех председателей секций симпозиума был признан как лучший доклад года – «BEST PAPER AWARD» с выдачей соответствующего сертификата.

Список литературы

1. Аракелян Э.К., Панько М.А., Асланян А.Ш. Методические положения оценки технико-экономической эффективности модернизации АСУ ТП электростанций // Теплоэнергетика. 2010. – №10. – С. 45–49.
2. Косой А.А. Выбор оптимальной структуры интеллектуальной АСУ ТП на базе ПТК: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2021.
3. Рубашкин А.С. Компьютерные тренажеры для операторов тепловых электростанций // Теплоэнергетика. – 1995. – № 10.
4. Рубашкин А.С., Рубашкин В.А. Развитие технологии моделирования динамических процессов на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. 2004. – № 10. – С. 40–43.
5. Аракелян Э.К., Рубашкин А.С. Перспективы использования компьютерных моделей тепломеханических процессов энергоблоков для повышения уровня проектирования и эксплуатации ТЭС // Теплоэнергетика. 2007. – № 10. – С. 43–45.

6. Аракелян Э.К., Рубашкин В.А. Проблемы разработки и использования всережимных компьютерных тренажеров в теплоэнергетике // Новое в российской электроэнергетике. – 2019. – №6. – С.6–12.

7. Матвиенко К.С. Исследование участия теплофикационного энергоблока Т-250 в регулировании частоты и мощности в энергосистеме на базе его тренажерной модели: дисс. ... канд. тех. наук. – М., 2011.

8. E.K Arakelyan, A.V. Andryushin, Mezin S.V, F.F. Paschenko, A.A. Kosoy. Using a Computer Simulator to Create a Digital Model of a CCGT Power Unit. Science Direct (CPES-2022).

Репин А.И.¹, Безуглов Е.А.²

ЭВОЛЮЦИОННЫЙ АЛГОРИТМ МНОГОЭКСТРЕМАЛЬНОЙ МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Представлен алгоритм SimplexEvolution, разработанный для повышения эффективности решения многоэкстремальных задач. Алгоритм является модернизацией метода Optim-MGA. В условиях развития многоядерных процессорных систем предложено параллельное выполнение алгоритма Optim-MGA в нескольких потоках, что позволяет повысить вероятность нахождения глобального экстремума.

Ключевые слова: SimplexEvolution, Optim-MGA, параллельное выполнение процессов, многоядерные процессорные системы.

Repin A.I.,¹ Bezuglov E.A.²

AN EVOLUTIONARY ALGORITHM FOR MULTIEXTREME MULTIPARAMETRIC OPTIMIZATION

The SimplexEvolution algorithm is presented, designed to improve the efficiency of solving multiextremal problems. The algorithm is a modernization of the Optim-MGA method. Given the development of multi-

¹ ООО «Лаборатория промышленного программирования «Байт».
LLC «Laboratory industrial programming «Byte».

² Московский энергетический институт (технический университет).
National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

core processor systems, parallel execution of the Optim-MGA algorithm in multiple threads is proposed, which increases the probability of finding the global extremum.

Keywords: SimplexEvolution, Optim-MGA, parallel process execution, multi-core processor systems.

1. Введение

В последнее время для синтеза и анализа систем управления активно применяются методы имитационного моделирования, которые предъявляют качественно новые требования к решению задач параметрической оптимизации. Для простых одноконтурных систем автоматического регулирования задачи оптимизации являются одноэкстремальными. Для сложных многоконтурных систем регулирования характерно наличие нескольких локальных экстремумов наряду с глобальным. Для решения одноэкстремальных задач хорошо зарекомендовал себя алгоритм Нелдера-Мида. Для решения многоэкстремальных задач предлагается модификация алгоритма Нелдера-Мида, сочетающая поиск по деформируемому многограннику, эволюционный поиск и параллельные вычисления.

2. Симплексный метод оптимизации Спендли, Хекста и Химсворта

Метод Нелдера-Мида является модификацией симплекс-метода, представленного в 1962 году Спендли, Хекстом и Химсвордом [1]. Идея метода состоит в перемещении симплекса в направлении оптимальной точки с помощью итерационной процедуры (рис. 1). Симплексом называют фигуру, образованную $n+1$ точками (вершинами) в n -мерном пространстве.

В одномерном пространстве симплекс есть отрезок прямой, в двумерном пространстве - треугольник; в трехмерном пространстве - треугольная пирамида (тетраэдр) и т.д. Процедура поиска минимума происходит следующим образом: определяется значение функции цели в вершинах симплекса, осуществляется зеркальное отражение

симплекса относительно точки с наибольшим значением и определяется значение функции в новой, отраженной точке.

Процедура повторяется. Если отражение от всех вершин дает худший результат, происходит сжатие симплекса. Алгоритм завершается, когда расстояние между вершинами не станут меньше заданного малого значения.

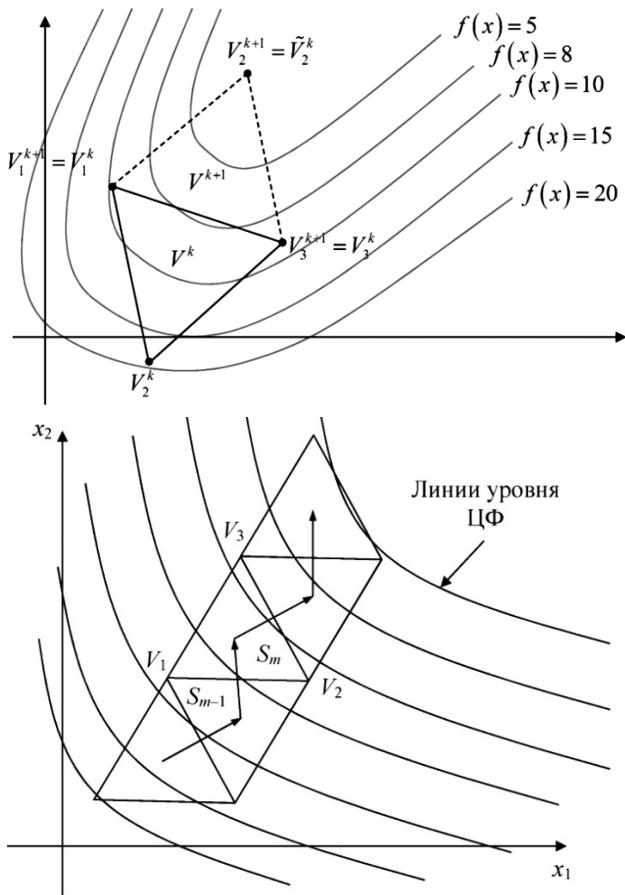


Рис. 1. Симплекс-метод

3. Метод Нелдера-Мида (метод деформируемого многогранника)

В 1965 году Нелдер и Мид предложили модификацию симплекс метода [2], в которой допускают, что симплекс может быть неправильный. Помимо операции отражения и сжатия, ввели операции растяжения и сокращения (рис. 2).

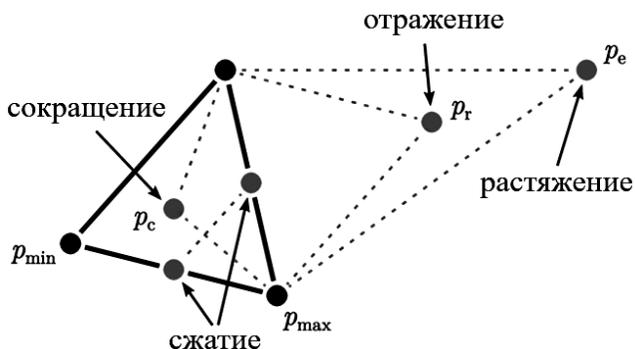


Рис. 2. Деформируемый многогранник

Метод Нелдера и Мида не использует производной функции, поэтому применим к негладким и зашумленным функциям. Недостатком метода является то, что он находит локальный экстремум. Если нужен глобальный экстремум, то метод не применим.

4. Эволюционные алгоритмы оптимизации (Optim-MGA)

Одними из самых эффективных алгоритмов глобального поиска являются эволюционные алгоритмы, которые работают в парадигме Particle swarm optimization [3]. Она предполагает наличие популяции поисковых точек (особей), которые взаимодействуют между собой с целью перемещения популяции в область глобального экстремума. В 2004 г. на кафедре АСУТП МЭИ разработан алгоритм многоэкстремальной оптимизации Optim-MGA [3], суть которого состоит в следу-

ющем. В пространстве поиска случайным образом размещается популяция поисковых точек, для каждой из которых определяется значение функции цели. На каждом этапе эволюции из популяции удаляется $\mu\%$ наихудших точек. Из оставшейся родительской группы точек выбирается случайным образом $N+1$ точка, к которой применяется метод Нелдера-Мида.

Полученный потомок будет лежать в локальном экстремуме и замещает одну из удаленных точек. Процедура повторяется до тех пор, пока удаленные точки не будут замещены новыми.

На следующем этапе эволюции действия повторяются до тех пор, пока разброс значений функции для точек не станет меньше заданного малого значения.

5. SimplexEvolution

Метод Optim-MGA хорошо себя показал для решения многоэкстремальных задач. Однако, как и любой эволюционный алгоритм он является вероятностным. Для повышения вероятности нахождения глобального экстремума необходимо запускать алгоритм несколько раз и выбрать из найденных решений лучшее.

Развитие многоядерных процессорных систем позволяет модернизировать алгоритм, создавая одновременно несколько потоков, в каждом запуская алгоритм Optim-MGA.

Кроме того, нужен ещё один супервизорный поток, в котором необходимо наблюдать за эволюцией каждой популяции и по завершению расчета необходимо выбрать лучшее решение.

Предложенный алгоритм носит название SimplexEvolution [5], как совокупность двух слов: симплекс и эволюция.

На рисунке 3 показаны графики, в котором показана вероятность нахождения глобального экстремума в зависимости от количества потоков и размера популяции.

Как видно из графика, вероятность нахождения глобального экстремума на 4х ядерном процессоре гораздо выше, чем на одноядерном.

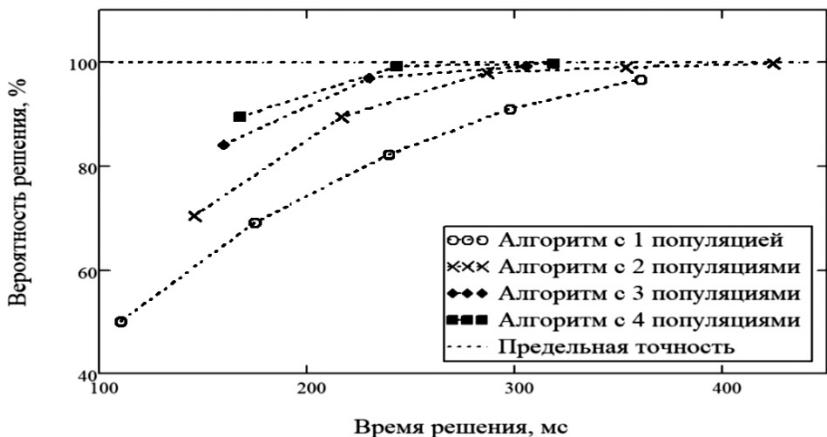


Рис. 3. Вероятность решения в зависимости от количества потоков

Список литературы

1. Spendley W., Hext G.R. and Himsworth F.R. Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation // Technometrics. – 1962. – Vol. 4. – P. 441.
2. Nelder J.A., Mead R.A. Simplex Method For Function Minimization // Computer J. – N.7. – 1964. – P.308–313.
3. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. – Харьков: Основа, 1997.
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. – С.78–85.
5. Repin A., Nesterenko V., Merzlikina E. Multiparametric Multiextremal Optimization Algorithm Software Simplex Evolution for MATLAB and Simintech Libraries // 2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).

Парчевский В.М.¹

ЭКОНОМИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПАРОГЕНЕРАТОРАМИ АЭС И ВВЭР

Аннотация. Целью исследования является решение вопроса об оптимальном уровне воды в каждом из парогенераторов АЭС с ВВЭР при работе энергоблока в маневренном режиме. Чем ниже уровень, тем ниже влажность насыщенного пара и выше КПД паровой турбины, но снижается безопасность энергоблока, так как снижается запас воды в парогенераторах, который может быть использован для охлаждения активной зоны реактора при тяжелых авариях, связанных с потерей теплоносителя. Чтобы количественно сравнивать ущерб от повышения уровня с выгодой от повышения безопасности, необходимо оценивать экономику и безопасность в одних и тех-же единицах, в данном случае в рублях. Это позволяет рассматривать задачу управления парогенераторами как однокритериальную и использовать для ее решения математический аппарат нелинейного программирования. Используются двухмерные сепарационные характеристики парогенераторов. Показано, что учет фактора безопасности существенно смещает оптимальные значения уровней в сторону больших значений, и это смещение тем больше, чем ниже нагрузка парогенератора.

Ключевые слова: горизонтальные парогенераторы, управление парогенераторами, сепарационные характеристики, целевая функция, безопасность АЭС, риск, маневренный режим, оптимальный уровень.

Parchevsky V.M.,¹ Candidate of Technical Sciences, Assoc.

ECONOMICS AND SAFETY IN THE CONTROL OF STEAM GENERATORS OF NUCLEAR POWER PLANTS WITH VVER

Abstract. The aim of the study is to solve the problem of the optimal water level in each of the steam generators of nuclear power plants with VVER during the operation of the power unit in a maneuverable mode. The

¹ к.т.н., доц. Национального исследовательского университета МЭИ, Россия, Москва, +7(985)148-51-40, parval9@yandex.ru
National Research University "MPEI", Russia, Moscow, parval9@yandex.ru

lower the level, the lower the humidity of saturated steam and the higher the efficiency of the steam turbine, but the safety of the power unit decreases, as the supply of water in steam generators decreases, which can be used to cool the reactor core in case of severe accidents associated with loss of coolant. In order to quantify the damage from an increase in level with the benefit from an increase in security, it is necessary to evaluate the economy and security in the same units, in this case in rubles. This allows us to consider the problem of controlling steam generators as a single-criteria one and use the mathematical apparatus of nonlinear programming to solve it. Two-dimensional separation characteristics of steam generators are used. It is shown that taking into account the safety factor significantly shifts the optimal values of the levels towards higher values, and this shift is the greater the lower the load of the steam generator.

Keywords: horizontal steam generators, steam generator control, separation characteristics, objective function, NPP safety, risk, maneuverable mode, optimal level.

Технологическая схема типового энергоблока с реактором ВВЭР-1000 содержит 4 горизонтальных парогенератора (ПГ), включенных параллельно и работающих на общий коллектор пара перед турбиной. ПГ должен надежно вырабатывать требуемое количество насыщенного пара заданного качества. Показателями качества пара являются давление и влажность. Давление поддерживается регулятором тепловой мощности реактора, а влажность – регуляторами уровня воды в ПГ. КПД турбин АЭС, работающих на насыщенном паре, существенно снижается при повышении влажности пара на входе в турбину, поэтому, в соответствии с правилами технической эксплуатации его массовая влажность не должна превышать 0,2%. В настоящее время в РФ АЭС участвуют в регулировании частоты и мощности энергосистем. В связи с необходимостью снижения выбросов парниковых газов доля АЭС в выработке электроэнергии постоянно возрастает. Необходимо переводить энергоблоки АЭС в маневренный режим работы для регулирования частоты и мощности в энергосистеме, так как маневренных блоков ТЭС и ГЭС не хватает. Влажность пара на выходе из ПГ зависит от двух параметров: нагрузки и уровня воды.

Нагрузкой управляет энергосистема, а уровень служит для поддержания влажности на заданном значении. Уровень воды является единственным режимным параметром ПГ, которым он может распоряжаться для «собственных нужд» в целях оптимизации своей работы. Для управления уровнем в каждом ПГ используются его сепарационные характеристики (СХ) в виде $\omega(h)$, показывающие зависимость влажности ω от уровня h при известной (обычно номинальной) относительной нагрузке d . Но при работе в маневренном режиме простые «одномерные» СХ уже не могут обеспечить качественное управление парогенераторами. Автором предложена расчетно-экспериментальная методика разработки и моделирования двумерных СХ (ДСХ) [1] в виде функции двух переменных $\omega(h, d)$. На рисунке 1 представлены типовые графики зависимости влажности пара ω , %, от уровня воды h , мм, при различных значениях относительной нагрузки d для типового ПГ ПГВ-1000М. Из рисунка видно, что допустимый диапазон уровня, при котором влажность не превышает 0,2%, с уменьшением нагрузки увеличивается.

Несмотря на то, что отдельные парогенераторы конструктивно идентичны, их СХ заметно различаются.

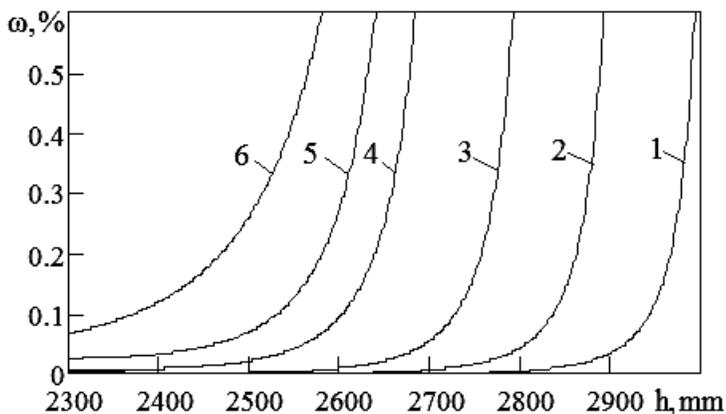


Рис. 1. Зависимость влажности пара ω от уровня воды h при относительных нагрузках d : 1–0.7; 2–0.8; 3–0.9; 4–1.0; 5–1.05; 6–1.1

Современные АСУ ТП должны обеспечивать оптимальное управление объектами. До настоящего времени дать четкий количественный ответ на вопрос, какой уровень является оптимальным при каждом значении нагрузки ПГ, не было возможности [2]. С одной стороны, чем ниже уровень, тем больше высота парового пространства над зеркалом испарения, меньше влажность пара на выходе из ПГ, выше КПД паровой турбины и, соответственно, энергоблока.. Экономика требует держать уровень на минимально-допустимом значении. С другой стороны, повышение уровня увеличивает запас воды в парогенераторах, а это связано с возрастанием безопасности работы энергоблока. При авариях, приводящих к нарушению отвода тепла от активной зоны реактора, например, при потере электроснабжения, петли первого контура переходят в режим естественной циркуляции и эта вода используется для охлаждения активной зоны.

С точки зрения управления параметр «уровень» содержит в себе два качественно различных разнонаправленных свойства, отражающих экономику и безопасность. Для сохранения однокритериальности оптимизационной схемы при решении вопроса об оптимальных уровнях воды в ПГ безопасность нужно перевести в экономическую категорию и тогда целевую функцию можно представить в виде двух слагаемых, отражающих экономическую и безопасностную составляющие, но с разными знаками. Из двух возможных вариантов смысла целевой функции («выгода» или «ущерб») в данной работе выбран «ущерб», минимуму которого соответствуют оптимальные уровни воды в ПГ. С учетом изложенных соображений целевая функция имеет вид:

$$R(h_1, h_2, h_3, h_4, d) = L(h_1, h_2, h_3, h_4, d) - P(h_1, h_2, h_3, h_4, d), \quad (1)$$

где R (Result) – суммарный ущерб, руб/ч; L (Loss) – ущерб от недовыработки электроэнергии, руб/ч; P (Profit) – компенсация ущерба повышением безопасности, руб/ч; h_1, h_2, h_3, h_4 – уровни воды в парогенераторах, мм; d - относительная нагрузка.

За начальную точку отсчета при всех нагрузках принимается $h_i = 2350$ мм. В этой точке для всех ПГ влажность пара минимальная и $L = 0$, запас воды в ПГ также минимальный и $P = 0$. При увеличении уровней воды в ПГ влажность пара начинает возрастать и величина

потерь L увеличиваться, запас воды также возрастает, увеличивая «антипотери» P . Оптимальный режим при известной (измеренной) нагрузке энергоблока d обеспечивают уровни воды h_i^* , при которых показатель R минимален.

*По данным ВНИИАМ [3], повышение влажности насыщенного пара на входе в турбину на 1% приводит к потере мощности 7 МВт. Эти данные положены в основу расчета составляющей целевой функции L . Наличие представленных в аналитическом виде ДСХ 4-х ПГ дает возможность рассчитывать средневзвешенную влажность пара в коллекторе перед турбиной для любого режима, определяемого совокупностью параметров $h_1 \dots h_4$, d и переводить ее в потери из-за недовыработки энергии L , руб/ч. В расчете использовалась цена продажи электроэнергии 1.436 руб/(кВт·ч), взятая из отчета генерирующей корпорации «Росэнергоатом» за 2016 г.

Основную трудность при решении поставленной задачи представляет адекватная оценка второй составляющей целевой функции $P(h_1, h_2, h_3, h_4, d)$. По своему смыслу эта составляющая представляет собой стоимостное выражение выгоды от повышения безопасности энергоблока при увеличении суммарного объема воды в 4-х ПГ при значениях уровней воды, превышающих «нулевое» значение 2350 мм. Необходимо перевести понятие «безопасность» в экономическую категорию, оцениваемую в рублях. Решение этой задачи разбивается на две подзадачи: первая состоит в том, чтобы получить методику оценки объема воды в ПГ, располагая значением уровня воды (показанием уровнемера h_i) и нагрузки ПГ d . Вторая – оценить «стоимость» каждого кубического метра воды в ПГ на весах безопасности.

В настоящее время не существует общепринятой, официально рекомендованной методики оценки запаса воды в горизонтальных парогенераторах. Это объясняется сложностью и недостаточной изученностью происходящих в ПГ гидродинамических процессов. Наиболее полно данный вопрос рассмотрен в книге [2]. Автором данной работы использован один из рассмотренных в [2] подходов к оценке запаса воды, добавив свои фрагменты расчета, в результате чего методика приобрела «товарный» вид четкого алгоритма, на входе которого задаются уровень воды h и нагрузка ПГ d , а на выходе – объем или масса воды в ПГ.

При оценке «стоимости» воды в ПГ может быть использован метод, основанный на использовании теории рисков. Экономическая оценка риска определяется по формуле [4]:

$$\text{Risk} = U \cdot P \quad (2)$$

где Risk – риск, руб/год; U – ущерб от аварии, руб; P – вероятность аварии, год⁻¹. При использовании выражения (2) для оценки стоимости запаса воды в ПГ необходимо выбрать тип аварии, ущерб от которой будет предотвращен или снижен путем использования запаса воды в ПГ, а также знать величину ущерба, связанного с аварией этого типа. Данный подход используется при вероятностном обосновании безопасности (ВОб) при проектировании и эксплуатации АЭС. Тем не менее, как признают авторы доклада [4] «величины P и U являются в общем случае статистически неопределенными, требующими для своей количественной оценки больших объемов исходной информации о природе, закономерностях, источниках, сценариях неблагоприятных событий ... фактически в отечественной и международной практике пока отсутствуют как общепринятые методы анализа, расчетов и моделирования аварий и катастроф, так и нормативная количественная база для обеспечения живучести, рисков и безопасности».

Есть альтернативный вариант, лишенный главных недостатков вероятностного подхода. Общество тратит на обеспечение безопасности столько, сколько, с одной стороны, нужно для обеспечения ее требуемого уровня, а с другой – сколько оно может себе позволить. АЭС оснащены определенным набором технических и организационных средств, назначение которых – обеспечить требуемый сегодня уровень безопасности. Необходимо отобрать те средства защиты, действие которых при аварии аналогично использованию воды в ПГ. Затраты на поддержание в режиме постоянной готовности к использованию одного кубометра воды в таких устройствах и дадут оценку стоимости 1 м³ воды в ПГ. Наиболее подходящим из таких устройств являются пассивная система аварийного охлаждения зоны (САОЗ) реактора. Каждый реактор оснащается 4-мя гидроемкостями объемом по 60 м³, в которых под давлением 6 МПа, создаваемым сжатым азотом, содержится 50 м³ водного раствора борной кислоты.

При оценке стоимости воды в гидроемкостях пассивной САОЗ, затраты приводились к ценам 2016 г. Расчеты выполнялись в соответствии с [5, 6]. Годовые затраты на изготовление, монтаж, эксплуатацию и вывод из эксплуатации оценивались по формуле, являющейся рыночным аналогом приведенных затрат:

$$Z = E \cdot K + C, \quad (3)$$

где Z – годовые затраты, руб./год; E – ставка рефинансирования ЦБ РФ, отражающая нижний порог эффективности капитальных вложений (инвестиций), $E = 0.1028$.; K – капитальные затраты на приобретение, монтаж и вывод из эксплуатации оборудования САОЗ, руб., C – годовые эксплуатационные затраты (себестоимость) на поддержание в работе САОЗ, руб./год.

Для оперативного управления уровнями в ПГ используется стоимость (z_w) 1 м³ воды в час. В результате расчетов получено: $z_w = 57.07$ руб/(м³·ч).

Располагая всеми компонентами целевой функции (1), можно выполнять расчеты по определению оптимальных значений уровней в ПГ для различных значений нагрузок энергоблока, в том числе и для управления парогенераторами в реальном масштабе времени. На рисунке 2 представлены графики зависимостей целевой функции R а также ее экономической L и «безопасностной» P составляющих от уровня для двух ПГ на номинальной нагрузке.

Оптимальные значения уровня соответствуют минимуму суммарных потерь и обозначены черными точками. Различия оптимальных значений уровня для разных ПГ при одинаковых нагрузках определяются отличиями их сепарационных характеристик. Для всех ПГ учет фактора безопасности сдвигает оптимальные значения уровней воды в сторону больших значений по отношению к базовому (2400 мм) уровню.

В зависимости от вида сепарационной характеристики (см. рис. 1) при работе на номинальной нагрузке смещение составляет от 83 до 166 мм. При снижении нагрузки смещение существенно возрастает.

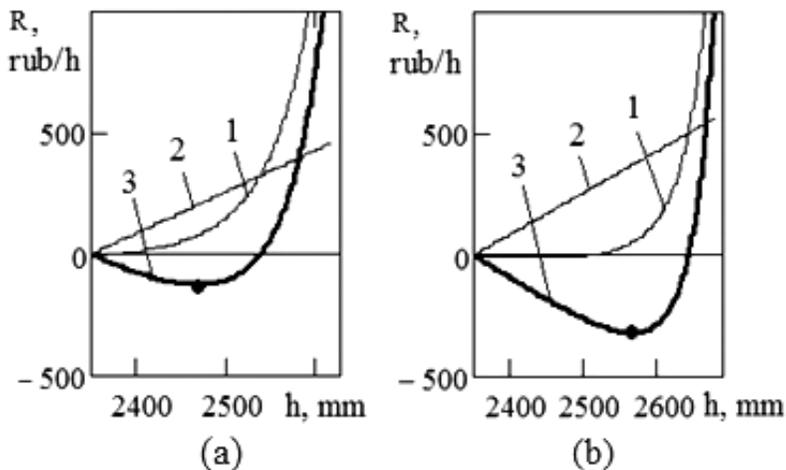


Рис. 2. Зависимости суммарного ущерба R (3), и его экономической L (1) и «безопасной» P (2) составляющих от уровня для парогенераторов (а) и (б)

Главный вывод, вытекающий из представленного доклада, состоит в том, что определение оптимального уровня воды в парогенераторе АЭС по комплексному критерию, учитывающему как экономику, так и безопасность, существенно смещает оптимальное значение уровня в сторону больших значений. Как известно, решение одной проблемы неизбежно порождает несколько других. В рассматриваемом случае в числе порожденных вопросов можно отметить два: первый заключается в том, насколько правомочен перенос стоимости воды в гидроемкостях пассивной САОЗ на воду в парогенераторах? Видимо, более правильно будет делать перенос не с коэффициентом 1, как это сделано в докладе, а с другим, больше или меньше единицы, учитывая специфику применения того и другого. Второй вопрос связан с тем, а нужно ли реально изменять существующую практику регулирования уровнем в ПГ, не учитывающую фактор безопасности? У автора доклада на последний вопрос пока однозначного ответа нет. На разных стадиях жизненного цикла эксплуатации АЭС вероятность тяжелых аварий различна, здесь, видимо, нужен дифференцированный подход и дополнительный анализ.

Список литературы

1. Парчевский В.М., Гурьянова В.В. Расчет и моделирование двухмерной сепарационной характеристики парогенератора АЭС с ВВЭР-1000 // Теплоэнергетика. – 2017. – № 1. – С. 25–30.
2. Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г. Гидродинамические и теплохимические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001.
3. Авдеев А. А. Оптимизация II контура АЭС с ВВЭР. Презентация доклада на Международном форуме «АТОМЭКСПО-2010». – М., 2010.
4. Комплексный анализ ресурса и безопасности ВВЭР в штатных и аварийных ситуациях / Н.А. Махутов., М.М. Гаденин // Материалы 6-й Международной научно технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Подольск, 2009.
5. Экономика энергетики: учебник для вузов / Н.Д. Роголёв, А.Г. Зубкова, И.В. Мастерова и др.; под ред. Р.Д. Роголёва. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011.
6. Структура стоимости строительства энергоблоков АЭС в РФ [Электронный ресурс]: Форум поставщиков атомной отрасли «АТОМ-ЭКС-Северо-Запад». СПб, апрель 2011.
URL: http://www.atomex.ru.mediafiles/u/files/presentSZ/Budylin_S.V..pdf (дата обращения 30.04.2023).

Ретин А.И.,¹ Безуглов Е.А.²

TUNEPID 2.0. ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ НАЛАДКИ АВТОМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Разработан программный продукт TunePID, помогающий проводить наладку одноконтурных САР. TunePID позволяет осуществить идентификацию объекта регулирования по кривым разгона, настроить

¹ ООО «Лаборатория промышленного программирования «Байт».

² Национальный исследовательский университет «МЭИ».

ПИ- и ПИД- регуляторы, оценить качество регулирования и уточнить настройки регуляторов по переходным процессам реально действующей САР.

Ключевые слова: наладка, САР, идентификация, адаптация, регулирование, ПИД регулятор.

Repin A.I.¹, E.A. Bezuglov²

TUNEPID 2.0. AN EFFECTIVE TOOL FOR ADJUSTING AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

The TunePID software has been developed to help adjust single-loop automatic control systems. TunePID allows identifying the control object by acceleration curves, adjusting PI and PID controllers, assessing the quality of regulation, and refining the controller settings by transient processes of a real automatic control system.

Key words: adjustment of single-loop automatic control systems, identification of the control object by acceleration curves, refinement of PI and PID controller settings.

1. Введение

Для ускорения процесса наладки систем автоматического регулирования (САР) в своих проектах в компании «Лаборатория промышленного программирования «Байт» разработан программный продукт TunePID. Отличительной особенностью программы является её автономность по отношению к SCADA-системе. TunePID подключается к технологическому процессу, получает от него обратную связь, но никаких возмущающих воздействий не вносит.

Версия программы TunePID 2.0 предназначена для наладки одноконтурных САР и позволяет:

- осуществить идентификацию объекта регулирования по кривым разгона;

¹ LLC «Laboratory industrial programming «Byte».

² National Research University «Moscow Power Engineering Institute».

- настроить регуляторы, функционирующие по ПИ- и ПИД-алгоритмам, оценить качество регулирования;
- уточнить настройки регуляторов по переходным процессам реально действующей САР (адаптация САР);

Идентификация предназначена для проведения первоначальной процедуры определения динамических характеристик объекта регулирования на этапе ввода САР в эксплуатацию.

После первоначального определения динамики объекта, производится определение настроечных параметров регулятора выбранной структуры. Процесс адаптации используется для уточнения настроечных параметров регулятора по переходным процессам при изменении задания регулятору.

Интерфейс программы представлен на рис. 1. Он состоит из дерева регуляторов, распределенных по технологическим подсистемам, панели настройки и анализа САР, меню и панели инструментов. В качестве исходной информации для наладки САР используются выборки переходных процессов, полученные в реальном времени из ПТК или из архивных данных SCADA-системы.

2. Источники данных

Источниками исходных данных для идентификации и адаптации являются:

- данные, получаемые в реальном времени из ПТК по OPC-DA или Modbus TCP протоколам;
- выборки переходных процессов из реляционных баз данных по SQL запросам;
- таблицы Excel, TXT файлы, а также ручной ввод.

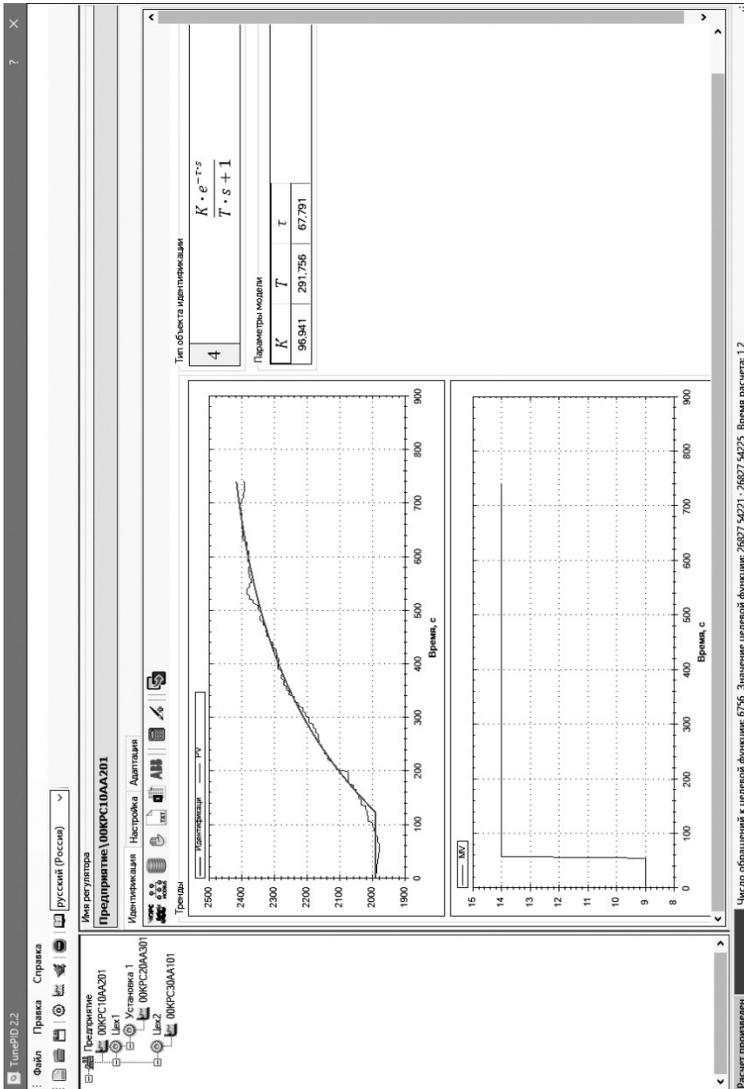


Рис. 1. Интерфейс TunePID

3. Идентификация

Идентификация объекта регулирования производится по кривой разгона. Кривую разгона рекомендуется снимать как в большую, так и в меньшую сторону относительно установившегося режима.

Экспериментально процесс идентификации происходит следующим образом:

1. Осуществляется соединение с OPC или Modbus TCP сервером. Указываются теги или регистры, соответствующие регулируемой величине и указателю положения регулирующего органа. Регулятор переводится в ручной режим и контролируется состояние объекта регулирования.

2. После стабилизации состояния регулирующей орган максимально быстро переводится на уровень $+\Delta x(t)$, через время переходного процесса переводится на уровень $-\Delta x(t)$, а после выхода на установившийся режим возвращается в исходное состояние переводом на уровень $+\Delta x(t)$. Величина $\Delta x(t)$ как правило выбирается порядка 5-15%.

3. Осуществляется запись переходного процесса в окне соединения, редактирование тренда и передача данных на панель идентификации.

6. В панели идентификации (рис.1) выбирается тип передаточной функции объекта и выполняется расчет параметров модели объекта.

После выполнения процедуры идентификации, параметры объекта передаются на панель настройки.

4. Настройка

В основе работы программы TunePID лежат методы имитационного моделирования и алгоритм глобальной оптимизации. В качестве алгоритма оптимизации используется алгоритм эволюционного поиска Optim-MGA, разработанный на кафедре АСУТП МЭИ (ТУ) [1].

На панели настройки регулятора выбирается тип алгоритма, ПИ- или ПИД-, тип исполнительного механизма, аналоговый или импульсный, а также указываются дополнительные параметры оптимизации. В качестве критерия оптимизации используется интегральный критерий по модулю при ограничении на частотный показатель колебательности [2,4]. По результатам расчета (рис. 2) можно оценить как временные, так и частотные характеристики САР (рис. 3), а также сравнить динамические характеристики при разных условиях расчета.

Идентификация Настройка Адаптация

По нагрузке

Выбор типа модели объекта регулирования

4

$$K \cdot e^{-\tau \cdot s} / (T \cdot s + 1)$$

Параметры модели объекта регулирования

K	96.941	291.756	67.791
T			
τ			

Параметры оптимизации

1.2 Допустимое значение частотного показателя колебательности $M_{доп}$

1.213 Расчетное значение частотного показателя колебательности M

0 Ограничение на $K_{р(с<)}$

0 Ограничение на $T(П >=)$

Настройка на задание Допустимое перерегулирование, %

Выбор типа регулятора

1

$$K_p + \frac{K_p}{T_I \cdot s}$$

Параметры настройки регулятора

K_p	0.026	218.93
T_I		

Исполнительный механизм

Тип ИМ Аналоговый

Время хода ИМ, с 0

Мин время импульса, мс 500

Время цикла, мс 100

Критерии качества

И лин	84203.846	Перерегулирование, %	298.411
И мод	84203.846	Время регулирования, с	1033.698
И кв	29556073.1	Степень затухания	1

Использовать нормирование

Шкала входа регулятора

Мин PV 0

Мак PV 100

Шкала выхода регулятора

Мин MV 0

Мак MV 100

Тренды

Рис. 2. Панель настройки регуляторов

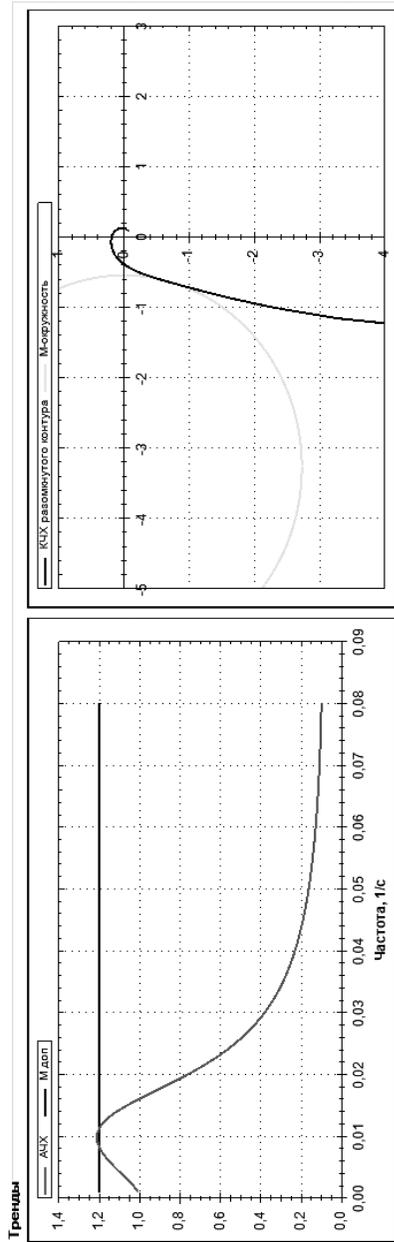


Рис. 3. Частотные характеристики САР

5. Адаптация

При определении параметров объекта по кривой разгона возможны определенные погрешности, обусловленные действием случайных возмущений, а также нелинейностью объекта. Для уточнения настроек регулятора рекомендуется снять переходные процессы по заданию. Зная текущие параметры настройки регулятора, с помощью алгоритма оптимизации по переходным процессам уточняются параметры объекта и, далее, определяются новые настройки регулятора.

Список литературы

1. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации и управления / Сабанин В.Р., Смирнов Н.И., Репин А.И. // *Exponenta Pro. Математика в приложениях.* – 2004. – №3–4. – С.78–85.
2. Чувствительность и робастная настройка ПИД-регуляторов с реальным дифференцированием / Смирнов Н.И., Репин А.И., Сабанин В.Р. // *Теплоэнергетика.* – 2007. – №10. – С.16–24.
3. Идентификация и адаптация САР с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации / Репин А.И., Смирнов Н.И., Сабанин В.Р. // *Промышленные АСУ и контроллеры.* – 2008. – №3. – С. 31–35.
4. Ротач В. Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

*Коньшев А.С.*¹

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ РЕШЕНИЙ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА В ОБОРОННО-ПРОМЫШЛЕННОМ КОМПЛЕКСЕ

Konyshev A.S.

Development and application of software and hardware solutions of domestic production in the military-industrial complex

Аннотация: работа посвящена разработке автоматизированной системы управления технологическим процессом на базе отечественных контроллеров. Рассмотрены основные преимущества использования

¹ Ведущий инженер-конструктор.

Leading Design Engineer +7(999) 823-02-13 АО «ФЦДТ «СОЮЗ», JSC «FCDT «SOYUZ».

российского оборудования. Описан опыт создания ПТК «Союз», внедренного при производстве изделия. Реализованные решения обеспечивают полную автоматизацию процессов, а также сокращение зависимости от импортных технологий для развития технологического суверенитета промышленности.

Ключевые слова: АСУ ТП, автоматизация, импортозамещение, отечественные контроллеры.

Abstract: the work is devoted to the development of an automated process control system based on domestic controllers. The main advantages of using Russian equipment are considered. The experience of creating the Soyuz PTK, implemented in the production of the product, is described. The implemented solutions ensure full automation of processes, as well as reduction of dependence on imported technologies for the development of technological sovereignty of the industry.

Keywords: automated process control systems, automation, import substitution, domestic controllers

Как известно из существующих исследований и практического опыта, автоматизированные системы управления (АСУ) играют ключевую роль в оптимизации производственных процессов, способствуя снижению издержек, минимизации влияния человеческого фактора и повышению качества выпускаемой продукции.

Однако в условиях современных глобальных вызовов, оказывающих значительное влияние на промышленный сектор, внедрение локальных технологических решений приобретает особую актуальность [1]. В связи с чем, представляется целесообразным рассмотреть опыт разработки автоматизированной системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) с использованием отечественных контроллеров.

При выборе контроллерного оборудования при разработке новых проектов, наибольшее внимание уделялось отечественным производителям, в которых явными преимуществами стали:

- *адаптивность:* контроллерное оборудование может быть легко интегрировано в существующие технологические процессы;
- *скорость производства:* производители обеспечивают выпуск продукции больших объемов в минимальные сроки;
- *поддержка и сервис:* оперативная техническая поддержка и быстрая замена компонентов в случае необходимости [2].

На базе отечественных контролеров был создан ПТК «Союз» способный обрабатывать до 1000 сигналов одновременно, интегрируя данные от датчиков и управляя десятками исполнительных устройств. ПТК был разработан с учетом имеющегося опыта создания надежных отказоустойчивых систем управления. Подобное решение позволило решить не только проблему импортозамещения, но также обеспечить необходимые параметры надежности и производительности технологических процессов.

Надежность всей системы обеспечивается как дублированием компонентов ПТК, так и дублированием программной среды управления, что позволяет безопасно вести и завершать процесс при возникновении нештатных ситуаций. В свою очередь, проведение комплекса расчетно-экспериментальных работ, позволило определить оптимальные параметры для управления технологическим процессом.

В процессе создания ПТК были разработаны и внедрены:

- телемеханические и объектные модели управления (SCADA/HMI для подсистем взаимодействия оперативного персонала с техпроцессом);
 - обеспечена стабильная работа интерфейса оператора, связанная со сбором, обработкой (в реальном времени между объектами автоматизации и интерфейсом оператора), архивирования информации;
 - системы дистанционного контроля за показателями технологического процесса с звуковой и световой индикацией;
 - алгоритмы автоматического управления объектами технологического процесса:
 - широтно-импульсного управления (ШИМ) двухходовыми клапанами систем автоматического поддержания температуры в теплообменниках;
 - пропорционально-интегрально-дифференциальных (ПИД) регуляторов для систем автоматического поддержания температуры технологических аппаратов;
 - автоматического наполнения и поддержания объема жидких компонентов во вспомогательных технологических ёмкостях;
 - управление системой изготовления готовой продукции;
 - автоматического дозирования компонентов и развески готовой продукции.

- блокировки технологических процессов согласно технологическому регламенту;
- автоматические замеры и расчеты параметров на наиболее важных участках процесса производства.

В настоящее время разработанная система успешно внедрена и эксплуатируется при производстве изделия. Применение существующего опыта, как специалистами нашей организации, так и разработчиками контроллерного оборудования, полученного в ходе разработки проекта, позволит применять его повсеместно на предприятиях отрасли.

В заключение следует подчеркнуть, что данный подход способствует снижению зависимости от импортных технологий, но и создает предпосылки для стимулирования роста отечественных отраслей, таких как машиностроение, электроника и разработка программного обеспечения.

Список литературы

1. Баланов А.Н. Автоматизация производства. Разработка и внедрение систем управления. – СПб.: Лань, 2024.
2. Обзор отечественных ПЛК // Control Engineering Россия. – 2022. – № 2 – С.24–39.

УДК 681.5; 621.1.016

Лозбичева П.Н.¹, Мерзликina Е.И.², Хоанг Ван Ва³

О НЕКОТОРЫХ СПОСОБАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА РАБОТЫ АСР С ТЕПЛОВЫМИ ОБЪЕКТАМИ

Lozbicheva P.N., Merzlikina Y.I., Khoang Wan Va

About some methods of transient processes quality improvement for automatic control systems with thermal plants

Аннотация. В работе рассматривается одноконтурная АСР с ПИ-регулятором и тепловым объектом с самовыравниванием и запаздыванием. Данная АСР оснащена модулем идентификации и адаптации

¹ НИУ «МЭИ».

² НИУ «МЭИ».

³ Университет Дай Нам, Ханой, Вьетнам.

для своевременного обновления математической модели объекта и пересчета параметров настройки регулятора. Анализируются два способа повышения качества работы АСР, внедрить которые позволяет наличие модуля идентификации и адаптации: применение модуля прогнозирования и применение предиктора Смита с оптимизацией параметров настройки регулятора. Показаны преимущества второго способа.

Abstract. This paper considers a single-loop control system with a PI-regulator and a non-integrating control plant with a time delay. These characteristics are typical for thermal plants. The control system under consideration is equipped with a module performing the plant identification and auto-tuning in order to make it possible to obtain a new plant model and a new regulator tuning parameters if necessary. Two ways of the transient process quality improvement are analyzed: the prediction module and the Smith predictor with the regulator tuning parameters optimization. The module performing identification and auto-tuning makes it possible to use the modules mentioned above in the control system. The advantages of the Smith predictor use are shown.

Ключевые слова: автоматическая система регулирования, АСР, идентификация объекта, автоматическая настройка, предиктор Смита, прогнозирование.

Key words: automatic control system, ACS, control plant identification, auto-tuning, Smith predictor, prediction.

Тепловые объекты управления и технологические процессы, характерные для теплоэнергетики и теплотехники, обладают рядом важных свойств, которые необходимо учитывать при создании автоматических систем регулирования (АСР) с этими объектами.

К таким свойствам можно отнести значительную инерционность и транспортное запаздывание, нестационарность и многомерность. Последнее свойство в этой работе рассматриваться не будет, ограничимся первыми тремя. Так как данные свойства плохо влияют на качество работы систем регулирования, то вопросы повышения качества регулирования вплоть до настоящего времени привлекают к себе внимание как в нашей стране [1-6], так и за рубежом [7-9].

Для теплоэнергетики и теплотехники характерно широкое использование типовых линейных законов регулирования (например, ПИ, существенно реже - ПИД) в составе АСР одноконтурной и, несколько реже, двухконтурной структуры [10]. Кроме того, там, где это возможно, применяются достаточно простые алгоритмы регулирования, например, пропорциональный или двухпозиционный [10].

Как известно из литературы [10], качество регулирования можно повысить двумя способами – либо усложнением алгоритма регулирования, либо усложнением информационной структуры АСР. Данная работа посвящена некоторым способам, относящимся к первой группе.

Развивать возможности одноконтурных (в, перспективе, возможно, и более сложных) систем регулирования представляется перспективным, так как, в связи с развитием приборостроения и информационных технологий, контроллеры и системы их программирования предоставляют инженерам множество возможностей [11], которые зачастую оказываются недоиспользованными.

Для того, чтобы можно было обеспечить эффективную работу АСР с нестационарным объектом, в ее состав имеет смысл включить модуль адаптации, решающий две задачи – получения актуальной модели объекта (как указывалось ранее, тепловые объекты во многих случаях нестационарны, то есть, их свойства по разным причинам изменяются со временем) и расчета параметров настройки АСР. В настоящее время существует достаточно много удобных и эффективных методов идентификации объекта регулирования и расчета параметров настройки АСР, например, [10, 12], широкому внедрению которых способствуют возможности современных программируемых контроллеров.

Перед вводом АСР в действие логично построить компьютерную модель АСР для того, чтобы оценить работоспособность спроектированной системы. Сейчас существует ряд программных пакетов, предназначенных для моделирования динамических систем, например, SimInTech, Engee, Jet и т.д., кроме того, модель может быть реализована в виде программы, например, на языке программирования Python, в котором есть библиотека для моделирования линейных динамических систем.

В данной работе в пакете SimInTech построена математическая модель одноконтурной системы регулирования с типовым линейным алгоритмом (ПИ, который можно считать самым распространенным промышленным регулятором) и инерционным тепловым объектом с самовывравниванием, передаточная функция модели которого имеет вид:

$$W(s) = \frac{k \cdot e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)} = V(s) \cdot e^{-\tau s}; \quad V(s) = \frac{k}{(T_1 s + 1) \cdot (T_2 s + 1)}, \quad (1)$$

где: k – коэффициент передачи, T_1 и T_2 – постоянные времени, τ – время запаздывания. Здесь и далее будем считать, что все интервалы времени указаны в секундах, а коэффициенты передачи приведены к безразмерному виду.

Для того, чтобы улучшить качество работы АСР в нее добавляется или модуль прогнозирования, работающий по линейному закону, или модуль предиктора Смита. Также АСР оснащена модулем идентификации и адаптации, обобщенная структура АСР приведена на рис. 1. Показанный на рис. 1 командный блок в данной работе рассматриваться не будет.

Для того, чтобы реализовать все необходимые составляющие, модель данной системы была реализована в пакете SimInTech в виде пакета проектов с общей базой сигналов, структура которого в общем виде приведена на рис. 2.

Таким образом, постановку задачи можно сформулировать следующим образом. Оценить влияние на качество работы одноконтурной АСР с ПИ-регулятором и тепловым объектом, оснащенной модулем идентификации и адаптации, работающим по алгоритму, описанному в [12], усложнения алгоритма регулирования. В качестве вариантов усложнения алгоритма регулирования рассматривается работающий по линейному закону модуль прогнозирования и модуль предиктора Смита, причем в АСР с предиктором Смита выполняется оптимизация параметров настройки.

В рамках данной статьи рассмотрим работу АСР на примере одного объекта. Для того, чтобы ситуация была приближена к реальности, модель рабочего объекта была получена с применением блока идентификации [12]. В рамках используемого алгоритма идентификации модель объекта получается по реакции этого объекта на прямоугольный импульс. Параметры объекта и модели приведены в табл. 1.

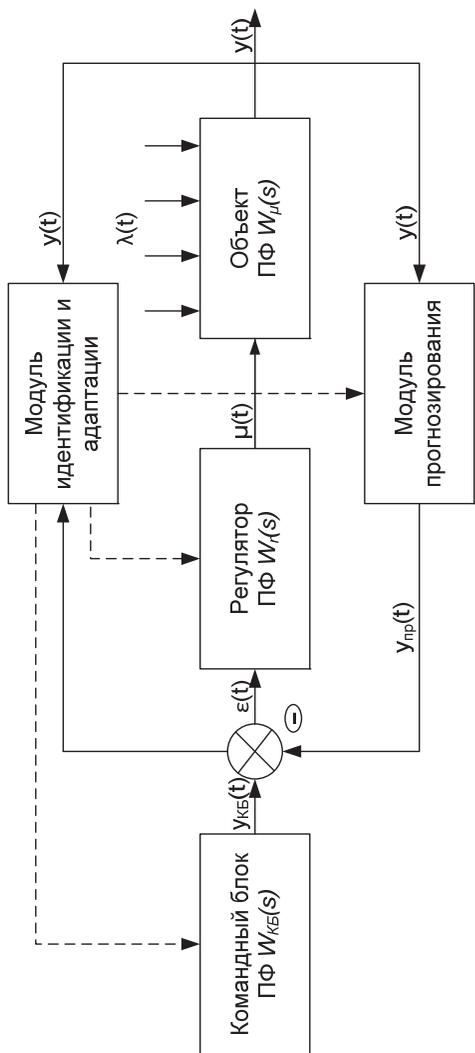


Рис. 1. Обобщенная структура рассматриваемой АСР

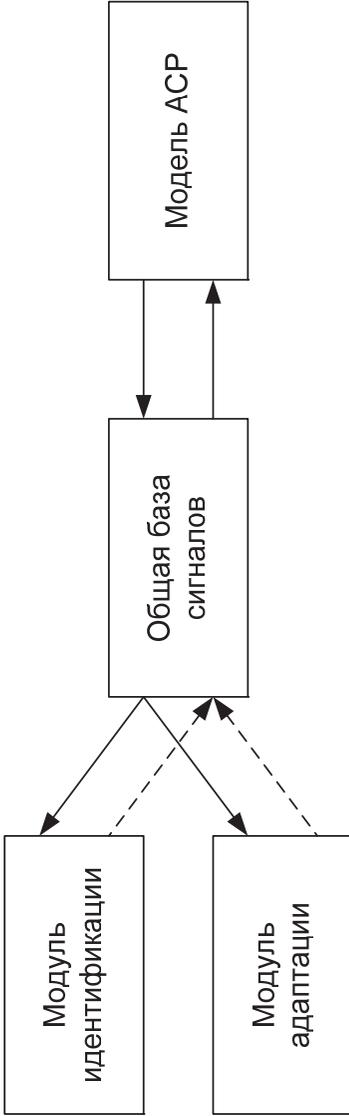


Рис. 2. Структура пакета проектов в SimInTech

Таблица 1

Параметры модели и рабочего объекта

		Рабочий объект			Модель		
k	T_1	T_2	τ	k_{mod}	T_{1mod}	T_{2mod}	τ_{mod}
1	16	80	6	0,84	16,4	61,3	6,5

Расчеты всех параметров регулирующего устройства и добавочных модулей проводятся по модели.

В данном случае, согласно [12], расчет параметров настройки регулятора проводился на минимум квадратичного интегрального показателя при значении частотного показателя колебательности $M = 1,4$, что приближенно соответствует степени затухания $\Psi \geq 0,95$.

Передаточная функция ПИ-регулятора имеет вид:

$$W_{PI}(s) = 3,1 \cdot \left(1 + \frac{1}{55,5 \cdot s}\right).$$

Передаточная функция модуля предиктора Смита имеет вид:

$$W_{PS}(s) = V_{mod}(s) - V_{mod}(s) \cdot e^{-\tau_{mod} \cdot s},$$

где: $V_{mod}(s)$ – дробно-рациональная часть модели объекта. В АСР с предиктором Смита, в соответствии с [4], имеет смысл оптимизировать параметры настройки регулятора относительно исходных значений: коэффициент передачи $k_{p,PS} = 2 \cdot k_p$ и постоянную времени интегрирования $T_{i,PS} = T_i/2$. Таким образом, для АСР с предиктором Смита передаточная функция ПИ-регулятора примет вид:

$$W_{PI}(s) = 6,2 \cdot \left(1 + \frac{1}{25,25 \cdot s}\right).$$

Передаточная функция модуля прогнозирования имеет вид:

$$W_{pred}(s) = 1 + \tau_{mod} \cdot n \cdot s = 1 + 6,5 \cdot 1,5 \cdot s = 1 + 9,75 \cdot s.$$

В данном случае время прогнозирования подбиралось в зависимости от времени запаздывания модели объекта, для АСР с ПИ-регулятором это время можно принять в полтора раза больше ($n = 1,5$) времени запаздывания модели.

Применение модуля идентификации объекта, позволяющего обновлять модель объекта по мере необходимости, позволяет не только оперативно обновлять параметры настройки регулятора, но и параметры настройки добавочных устройств (предиктора Смита и блока прогнозирования).

Переходные процессы в рассматриваемых АСР (в качестве входного воздействия во всех случаях используется единичное ступенчатое воздействие) представлены на рис. 3.

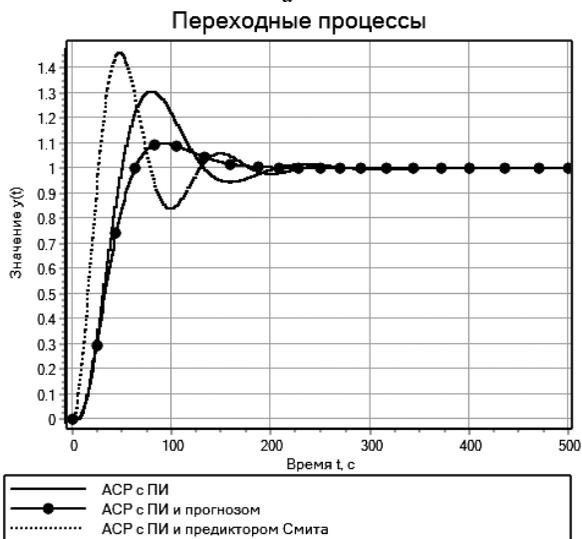
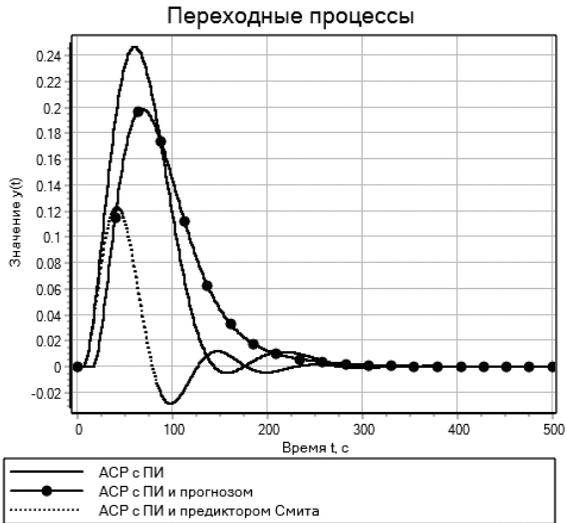


Рис. 3. Переходные процессы в рассматриваемой АСР:
 а – процессы при ступенчатом возмущении на вход объекта;
 б – переходные процессы при ступенчатом изменении задания

Из представленных переходных процессов видно, что улучшение качества при изменении задания и при возмущении на вход объекта происходит по-разному. Будем рассматривать, в первую очередь переходные процессы при возмущении на вход объекта, качество которых в теплоэнергетике можно считать более важным. Из представленных на рисунке 3а переходных процессов видно, что наибольший эффект имеет применение предиктора Смита с последующей оптимизацией параметров настройки ПИД-регулятора. В данном случае в два раза уменьшилось динамическое отклонение (с 0,24 до 0,12), также значительно уменьшилось время регулирования (приблизительно с 250 до 170 с), существенного ухудшения запаса устойчивости при этом не произошло.

Расчеты, проведенные с другими объектами, модели которых имеют передаточную функцию вида (1), дали сходные результаты.

Таким образом, можно сделать вывод, что при наличии модуля идентификации и адаптации, а также при оптимизации параметров настройки, применение блока предиктора Смита дает заметное улучшение качества регулирования. При этом необходимо отметить, что модуль прогнозирования реализуется проще, хотя и дает меньший эффект.

Список литературы

1. Бураков М.В. Мультимодельная адаптивная система управления для объекта с переменной задержкой // Мехатроника, автоматика и робототехника. – 2017. – № 1. – С. 115–119.
2. Бажанов В.Л. Предиктор Смита для универсальных цифровых регуляторов // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 2. – С. 10–17.
3. Бураков М.В. Модифицированный предиктор Смита для объекта с переменной задержкой // Труды СПИИРАН. – 2017. – № 2(51). – С. 60–77.
4. Кузищин В.Ф. ПИД-регулятор с предиктором и алгоритмом автоматической настройки: исследование эффективности для тепловых объектов // Теплоэнергетика. – 2017. – № 9. – С. 80–90.

5. Пикина Г.А. Прогностические типовые алгоритмы регулирования // Теплоэнергетика. – 2011. – № 4. – С. 61–66.
6. Паленов М.В. Адаптивные ПИД-регуляторы с конечно-частотной идентификацией: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 2011.
7. Perez S.S., Bedoya A., Molina D.A., Camacho O. Fuzzy Smith Predictor vs Smith Predictor: An experimental evaluation for a thermal process with dead time // Sixth Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM). – Quito, Ecuador. – 2022. – P. 1–6.
8. Idir A., Akroum H., Tadjer S.A., Canale L. A Comparative Study of Integer Order PID, Fractionalized Order PID and Fractional order PID Controllers on a Class of Stable System // International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). – Madrid, Spain, 2023. – P. 1–6.
9. Mardijah, A. Hakam and D. K. Arif, PID-MPC Control Design To Control Oil Temperature In Main Fermentor Machine PT.Cheil Jedang, Jombang-Indonesia // International Conference on Computer Engineering, Network and Intelligent Multimedia (CENIM). – Surabaya, Indonesia, 2018. – P. 71–76.
10. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник; – 5-е изд., – М.: Изд. дом МЭИ, 2008.
11. Lu J. Application of PLC Control Technology in Intelligent Automatic Control // Asia-Pacific Conference on Image Processing, Electronics and Computers (IPEC), Dalian, China, 2022. – P. 1166–1169.
12. Кузицин В.Ф. Алгоритмы ускоренной автоматической настройки регуляторов с оценкой модели объекта по его реакции на импульсное воздействие и в режиме автоколебаний // Теплоэнергетика. – 2014. – № 4. – С. 35.

Пикина Г.А., Косой А.А., Минькин А.А., Беляев В.П.
**РАЗРАБОТКА НОНИУСНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ
УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТАМИ ЭНЕРГЕТИКИ¹**

Pikina G.A., Kosoy A.A., Minkin A.A., Belyayev V.P.
**Development of Vernier Controllers to Improve the Accuracy
and Reliability of Control in Energy Systems**

Аннотация. В данном исследовании рассматривается проектирование нониусных регуляторов, целью которых является повышение точности и надежности управления энергосистемами. Анализируются основополагающие принципы построения нониусных контуров, раскрываются их достоинства в контексте сложной динамики энергетических сетей и изучаются аспекты практического применения. Результаты показывают, что подобные системы гарантируют погрешность управления, не превышающую 0,1%, а также обладают устойчивостью к внешним возмущениям, что способствует увеличению энергоэффективности и безопасности функционирования.

Ключевые слова: нониусные регуляторы, энергосистемы, точность управления, устойчивость, энергоэффективность

Abstract. This study examines the design of vernier regulators aimed at improving the accuracy and reliability of control in energy systems. The fundamental principles of constructing vernier control loops are analyzed, their advantages are revealed in the context of the complex dynamics of power networks, and aspects of practical application are explored. The results show that such systems ensure a control error not exceeding 0.1% and demonstrate resistance to external disturbances, contributing to increased energy efficiency and operational safety.

Key words: vernier regulators, energy systems, control accuracy, stability, energy efficiency.

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, Москва.
National Research University «MPEI», Russia, Moscow.

Введение. Современные энергетические объекты – теплоэлектростанции, гидроэлектростанции, сети распределения, ветряные электростанции – функционируют в условиях динамичного и крайне сложного окружения. Эта сложность обусловлена нелинейными процессами, вариативностью генерации энергии от возобновляемых источников, а также влиянием внешних воздействий (Engineering Toolbox, 2025). Бесперебойность работы, предотвращение аварий и оптимизация энергопотребления критически зависят от точного мониторинга таких параметров, как напряжение, температура и давление. Использование традиционных цифровых ПИД-регуляторов, несмотря на высокую частоту обновления, ограничено дискретностью аналого-цифровых преобразователей и доступными вычислительными мощностями процессоров.

Альтернативное решение, предлагаемое нониусными регуляторами, базируется на принципе высокоточной настройки, аналогичном принципу работы нониусной шкалы, что позволяет достичь сверхвысокого разрешения и повысить надежность системы. Данный доклад посвящен рассмотрению архитектуры, алгоритмов и практических аспектов применения нониусных систем в энергетической сфере.

Нониусные регуляторы: проектирование и применение в энергетике. Принцип нониуса, первоначально предназначенный для прецизионных измерений, нашел широкое применение в системах автоматического регулирования, обеспечивая высокую точность управления. Регуляторы, построенные с его использованием, используют многоуровневую архитектуру, включающую в себя грубый и точный контуры. Грубый контур отвечает за стабилизацию регулируемого параметра, такого как напряжение или температура, в то время как точный контур, основанный на нониусе и цифровых алгоритмах интерполяции, корректирует незначительные отклонения с разрешением до 0,01% (ResearchGate, 2013).

Проектирование таких регуляторов базируется на каскадной структуре: внешний (медленный) контур задает целевое значение, а внутренний (быстрый) контур оперативно реагирует на возникающие возмущения. Повышение устойчивости системы достигается за счет

внедрения адаптивных алгоритмов, которые компенсируют нелинейности системы (MathWorks PID Tuning, 2025). Реализация таких регуляторов возможна с использованием контроллеров, например, Sauter RCP 30/31, и различных модулей, таких как Parker 8311 (Sauter RCP Manual, 2008; Parker 8311, 2025).

В энергетической отрасли нониусные регуляторы пользуются большим спросом для поддержания заданных параметров с высокой точностью. Например, в котлах ТЭЦ они обеспечивают стабилизацию температуры пара с погрешностью $\pm 0,05$ °С, минимизируя влияние колебаний, вызванных нестабильностью подачи топлива (Control.com, 2025). При регулировании напряжения на электростанциях практикуется комбинированный подход, включающий в себя грубую настройку (OLTC) и тонкую корректировку (AVR), что критично для эффективного функционирования возобновляемых источников энергии (Eaton, 2023).

Преимущества нониусных систем сопровождаются некоторыми ограничениями: сложность применяемых алгоритмов и относительно высокая стоимость оборудования могут усложнять процесс внедрения. Тем не менее, высокая надежность, обеспечивающая наработку на отказ более 10^6 часов, оправдывает сделанные инвестиции (Sauter RCP Manual, 2008). Перспективы развития связаны с использованием машинного обучения для оптимизации управления в режиме реального времени (MathWorks Technical Article, 2024).

Заключение. Нониусные регуляторы открывают широкие перспективы в энергетическом менеджменте, обеспечивая невиданную точность регулировки, достигающую десятых долей процента, и демонстрируя поразительную помехоустойчивость. Сложная многоуровневая структура в сочетании с совершенными контурами регулирования успешно решает проблемы, вызванные нелинейными процессами и флуктуациями в производстве энергии.

Хотя внедрение сопряжено с некоторыми сложностями, дальнейшее усовершенствование технологии, предусматривающее упрощение алгоритмов и оптимизацию затрат, укрепит позиции нониусных систем в энергетике, способствуя созданию более надежной и производительной инфраструктуры.

Список литературы

1. Инженерный инструментарий. Нониусная шкала // Инженерный инструментарий. – 2025.
2. Студент-технолог. Принцип работы штангенциркуля // Студент-технолог. – 2024.
3. Eng. LibreTexts. Каскадное управление // LibreTexts Engineering. – 2023.
4. MathWorks. Рекомендации по настройке ПИД-регулятора // MathWorks. – 2025.
5. Parker NA. Прецизионный регулятор Parker, модели 8310 и 8311 // Parker North America. – 2025.
6. Control.com. Основные стратегии управления процессами: каскадное управление // Control.com. – 2025.

УДК 621.22: 681.5

Тверской Ю.С., Голубев А.В., Гайдина Ю.А.

О ПРОБЛЕМАХ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ АСУТП ЭНЕРГОБЛОКОВ В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ¹

Аннотация

Современный период развития многофункциональных АСУТП энергоблоков электростанций связан с разработкой элементов искусственного интеллекта и с технологией процесса интеллектуализации сложной системы. Рассматриваются некоторые особенности решения проблем интеллектуального совершенствования автоматизированных систем и элементы технологии модернизации многофункциональных

¹ ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет. им. В.И. Ленина», г. Иваново kafsu@su.ispu.ru; tverskkoj@mail.ru

АСУТП на базе ПТК, обеспечивающие преобразование сложной системы от проектно-текущего состояния до интеллектуально-эффективного уровня. Показано, что аспекте развития современных многофункциональных АСУТП на базе ПТК сетевой иерархической структуры интеллектуализация системы требует решения задач на информационном (полевом), локальном (контроллерном) и командно-аналитическом уровнях.

Ключевые слова: АСУТП, ПТК, интеллектуализация, технология, эффективная информация

Tverskoy Y.S., Golubev A.V., Gaidina Y.A.

**ABOUT THE PROBLEMS OF MODERN TECHNOLOGY
OF MULTIFUNCTIONAL APCS FOR POWER UNITS
UNDER CONDITIONS OF THEIR LONG OPERATION¹**

Annotation

The current period of development of multifunctional control systems for power plant power units is associated with the development of elements of artificial intelligence and the technology of the process of intellectualization of a complex system.

Some features of solving the problems of intellectual improvement of automated systems and elements of the technology for modernizing multifunctional automated process control systems based on hardware systems, ensuring the transformation of a complex system from the design-current state to an intellectually efficient level, are considered.

It is shown that in the development of modern multifunctional automated process control systems based on the hardware and software of a network hierarchical structure, the intellectualization of the system requires solving problems at the information (field), local (controller) and command-analytical levels.

¹ Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin
kafsu@su.ispu.ru; tverskkoj@mail.ru

Key words: process control system, industrial complex, intellectualization, technology, effective information

Введение

В аспекте ретроспективного анализа развития и становления АСУТП электростанций можно выделить следующие периоды: 1) разработка систем локального управления (1950–1980), 2) создание АСУТП в виде СКУ и ИВС (1980–2003), 3) развитие АСУТП на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры (2003 - 2020). Этот период характеризуется разработкой методологических основ построения многофункциональных АСУТП и технологии модернизации сложных систем управления. При этом в связи с присутствием в контуре управления человека-оператора, многофункциональные АСУТП электростанций изначально рассматриваются в классе эргатических систем управления [1,2,3].

Современный период развития АСУТП связан с разработкой элементов искусственного интеллекта [4] и с технологией процесса интеллектуализации автоматизированных систем. При этом интеллектуальное совершенствование сложной системы направлено на усиление интеллектуальной силы человека-оператора путем создания «человечно-компьютерных систем гибридного интеллекта» [5,6].

Находящиеся в эксплуатации АСУТП соответствуют комплексу требований на момент разработки технического задания и сдачи пускового комплекса в эксплуатацию. С течением времени возникают разного рода технологические ограничения, происходит изменение динамических свойств объектов/процессов управления, характеристик регулирующих органов (люфт, выбег, гистерезис и т.п.) и др., с учетом которых формируется *проектно-текущее состояние объекта управления и его систем управления*. В условиях длительной эксплуатации, которая предусматривает участие энергоблоков ТЭС/АЭС в ОПРЧ/НПРЧ, соответственно возникают противоречия между современными требованиями к системе управления и возможностями их реализации средствами штатной АСУТП [7,8]. Поэтому развитие технологии совершенствования многофункциональных АСУТП энергоблоков *от проектно-текущего состояния до интеллектуально-эффективного уровня* представляется своевременной актуальной задачей.

Суть проблем технологии интеллектуализации

Особенность функционирования современных АСУТП энергетических объектов заключается во взаимодействии двух процессов: технологического, протекающего в технологическом объекте управления (ТОУ), и связанного с ним процесса обработки информации и формирования команд в управляющей системе. При этом научно-техническая суть проблем заключается *в создании эффективного взаимодействия этих процессов* путем выполнения наукоемких процедур оптимизации:

- *информационного пространства* – обоснование необходимого и достаточного объема первичных преобразователей и определение минимально необходимого информационного масштаба системы (минимизация стоимости эксплуатационного ресурса);

- *подсистем локального/контроллерного уровня* с точки зрения структурного синтеза живучих/структурно устойчивых эффективных САУ, обеспечивающих гарантированную работоспособность на контроллерном и исполнительном уровне, в том числе с эффективными математическими моделями в контуре управления и в условиях технологических ограничений;

- *подсистем верхнего командно-аналитического уровня* АСУТП, обеспечивающих оптимизацию режима работы оборудования, его многофункциональную диагностику и др. путем создания соответствующего интеллектуального программного обеспечения;

- *технической структуры* АСУТП и ПТК в аспекте реализации САУ с математическими моделями в контуре управления с использованием виртуальных контроллеров и алгоритмов верхнего командно-аналитического/интеллектуального уровня.

Основной результат

Объем работ по интеллектуальному совершенствованию многофункциональных АСУТП на базе ПТК включает [1-3,6]:

- технический аудит АСУТП и выявление «узких мест» автоматизированного оборудования, находящегося в штатной эксплуатации;

- разработка обобщенной феноменологической модели сложного процесса/объекта в виде потокового графа работ и передаваемых энергий;

- обобщенный термодинамический анализ локальных технологических участков/подсистем и формирование вектора термодинамических координат, необходимых и достаточных для эффективного управления (обоснование объема первичной информации);

- структуризация модели «вход-выход» перераспределенного объекта управления согласно принципу необходимого разнообразия У. Эшби в условиях ограничений по управлениям;

- синтез эффективных информационных структур САУ с колебательными объектами и принятие решения по их иерархическому построению;

- разработка схем расчетных структур эффективных САУ, методик расчета и технологии настройки многосвязной иерархической системы управления (технология преобразования штатной структуры САУ в эффективную и методика ввода ее в эксплуатацию);

- разработка аппарата реализации сетевой структуры взаимодействия подсистем технической структуры ПТК и программного обеспечения интеллектуальных функций АСУТП, в том числе - тестирования программного обеспечения в режиме реального времени.

Формирование вектора необходимой и достаточной информации и адекватной базы данных АСУТП связано с проблемой наблюдаемости и управляемости технологического объекта управления (ТОУ), решается средствами методологии феноменологической термодинамики необратимых процессов и методами, как правило, классической инженерной теории управления. При этом обобщенный термодинамический анализ эффективности процесса выполняют в режимном аспекте, а объект управления представляют в виде модели «вход-выход», структурированной в соответствии с принципом необходимого разнообразия У. Эшби (путем выделения эффективных регулируемых параметров, регулирующих воздействий и внешних контролируемых возмущений, а также параметров, отнесенных к ограничениям) [9-14].

В аспекте технологии модернизации требует выполнить апгрейд существующей базы первичной информации. При этом проблема наблюдаемости усложняется недоступностью ряда важных параметров (расход пылеугольного топлива, температура за камерой сгорания ГТУ и т.п.) для непосредственного контроля и оцениваемых

путем косвенных измерений, которые искажены случайными факторами и несут разный объем полезной информации о процессе. Кроме этого, задача структурного синтеза и параметрической оптимизации автоматических систем регулирования осложняется необходимостью дополнительного учета стохастической составляющей эксплуатационных возмущений [15,16].

На верхнем командно-аналитическом (интеллектуальном) уровне АСУТП эффективность управления также связана с полнотой и качеством используемой информации, в том числе поступающей на хранение в архив АСУТП, а также с недостаточной проработанностью ППО, с итерационным характером алгоритмов и др.

Технологичность создаваемых многофункциональных АСУТП будет обеспечена путем следующих общих концептуальных положений:

1) технические средства и элементы АСУТП должны быть стандартизированы (обеспечивает удобство монтажа и возможность «горячей» замены);

2) технические средства полевой зоны, размещаемые вблизи технологического оборудования, должны быть устойчивы к длительному воздействию температуры ($-40...+60^{\circ}\text{C}$) и сильных электромагнитных помех, изменениям напряжения питания и вибрации;

3) рабочие и инженерные станции должны быть резервированы и обеспечивать достаточную скорость обмена с минимальным временем переключения (использование оптических интерфейсов позволяет сократить количество шкафов сетевого и полевого оборудования);

4) локальные ПТК автоматизированного оборудования комплектных поставок (например, паровых турбин, ГТУ, пылесистем) для интеграции в проектную АСУТП с базовым проектно-компоновемым ПТК должно быть стандартизированы, а стандарты интеграции своевременно доведены до сведения поставщика оборудования;

5) время ответа системы на запрос по сети для ТМО ТЭС не должно превышать время реакции, требуемое для исполнения технологических защит);

6) системные, инструментальные и программные средства не должны между собой «конфликтовать», должны обеспечивать поддержку высокоскоростного обмена данными между всеми подсистемами в структуре АСУТП;

7) ПТК должны содержать инструментальные программные средства имитационного моделирования с целью развития АСУТП в направлении формирования интеллектуальных функций и процедур на основе эталонных математических моделей, обучающихся нейросетевых структур и др.;

8) кибербезопасности при виртуальной отладке прикладного программного обеспечения (ППО) системы (например, на АРМ инженера АСУТП специалистом из удаленного офиса);

9) ППО осуществляется инструментальными средствами проектирования ПТК в виде ППО контроллеров в составе базового ПТК;

Совершенствование многофункциональных АСУТП энергоблоков и электростанций в аспекте создания систем гибридного интеллекта требует формирования адекватной технической политики и соответствующей мотивации персонала электростанций [17]. При этом для оптимизации процесса преобразования многофункциональной АСУТП *от проектно-текущего состояния до интеллектуально-эффективного уровня* в ограниченные сроки текущих и/или капитальных ремонтов целесообразно использовать также методы теории финитного управления.

Выводы

Задача интеллектуализации АСУТП путем создания «человеко-компьютерных систем гибридного интеллекта» является междисциплинарной, поскольку затрагивает многие научные направления в области системного анализа и живучести сложных систем, теории иерархических и многокритериальных систем управления. Ее решение во многом связано с общими проблемами теории и технологии создания эффективных систем управления на трех уровнях сложной системы: информационном (полевом), локальном (контроллерном) и системном (командно-аналитическом).

Список литературы

1. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП электростанций: монография: В 3 кн.; под ред. Ю.С. Тверского. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Кн. 1 «Проблемы и задачи»; Кн. 2 «Проектирование»; Кн. 3 «Моделирование».

2. Тверской Ю.С. Локальные системы управления. Введение в многофункциональные АСУТП электростанций: учебник. – СПб.: Лань, 2024.

3. Тверской Ю.С., Таламанов С.А. Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций. // Теплоэнергетика. – 2010. – №10. – С.37–44.

4. Национальная стратегия развития искусственного интеллекта на период до 2030 года. /Утв. Указом Президента РФ от 10.10. 2019 г. № 490.

5. Искусственный интеллект: проблемы и перспективы / Кудрявцев В.Б., Козлов В.Н., Рыжов А.П. и др. // Интеллектуальные системы. Теория и приложения. – М.: МГУ, 2020. – Т. 24. – Вып. 4. – С. 33–44.

6. Тверской Ю.С., Гайдина Ю.А. О технологии интеллектуализации АСУТП на базе ПТК / Электрические станции. – 2023. – № 10. – С.40–48.

7. ГОСТ Р 55890—2013. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования (утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 05.12.2013 № 2164-ст; с изм. ред. от 25.12.2019).

8. О критериальных системно-рыночных противоречиях в электроэнергетике и их связи с задачами эффективного управления балансом мощности в электроэнергетической системе // Ю.С. Тверской, В.А. Демьяненко, М.Ю. Тверской и др. // Новое в российской электроэнергетике. – 2022.– №3. – С. 6–21.

9. Вейник А.И. Теория движения. – Минск: Наука и техника, 1969.

10. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: В 5 т.; 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Н.Д. Егупова, К.А. Пупкова. – Т.3. Синтез регуляторов систем автоматического управления. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

11. Красовский А.А. Развитие и становление современной теории управления // Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А.А. Колесникова. – М.: Физматлит, 2004. – С. 13–34.

12. Ротач В.Я. О фазы-ПИД-регуляторах // Теплоэнергетика. – 1999. – № 8. – С. 32–36.

13. Tverskoi D.Yu. A generalized thermodynamic analysis of the efficiency of coal-pulverization systems // Thermal Engineering. – 2010. – Т.57. – № 8. – Р. 682–688.

14. К вопросу структурного синтеза эффективных систем управления технологическим процессом / Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев, Д.Ю. Тверской и др. // Датчики и системы. – 2022. – № 6. – С.20–32.

15. Антонова О.Б., Таламанов С.А., Тверской Ю. С. Определение точности частотных характеристик, получаемых на основе обработки семейства кривых разгона // Автоматика и телемеханика. – 1983. – № 5. – С. 28–38.

16. Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Агафонова Н.А. Методы интервальной оценки частотных характеристик и робастной настройки систем управления: монография // Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2010.

17. О формировании технической политики электростанций по модернизации систем контроля и управления и созданию полнофункциональных АСУТП / В.К. Крайнов, Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов и др. // Электрические станции. – 2002. – №1. – С. 10–13.

УДК 621.22: 681.5

Тверской Ю.С., Муравьев И.К.

О ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМАХ ЭФФЕКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ¹

Аннотация

Современные энергоблоки, построенные на базе парогазовых технологий, существенно поднимают эффективность использования

¹ ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина», г. Иваново kafsu@su.ispu.ru; tverskkoj@mail.ru

топливно-энергетических ресурсов. Для обеспечения эффективности бинарного энергоблока в условиях длительной эксплуатации необходимо согласовать противоречивые требования режимных условий сложного объекта управления. Вскрыта суть проблем эффективного управления активной мощностью ГТУ в широком диапазоне нагрузок. Рассмотрены проблемы наблюдаемости и управляемости процесса, климатическая, конструктивная, функциональная, технологическая, которые связаны с особенностями процесса смесеобразования и горения топлива в камере сгорания, конструктивными и физическими характеристиками установок, особенностями тепловых схем энергоблоков. Показаны методологические основы структурного синтеза эффективных систем автоматического управления мощностью ГТУ.

Ключевые слова: АСУТП, эффективное управление, парогазовая технология, газотурбинная установка, камера сгорания, обобщенный термодинамический анализ, структурный синтез

Tverskoy Y.S., Muravyov I.K.

ABOUT PHYSICAL PROBLEMS OF EFFECTIVE POWER CONTROL OF GAS TURBINE INSTALLATIONS UNDER LONGTERM OPERATION CONDITIONS¹

Annotation

Modern power units built on the basis of combined cycle technologies significantly increase the efficiency of using fuel and energy resources. To ensure the efficiency of a binary power unit under long-term operation conditions, it is necessary to reconcile the conflicting requirements of the operating conditions of complex facility management. The essence of the problems of effective control of the active power of gas turbine plants in a wide range of loads is revealed. The problems of observability and controllability of the process, climatic, structural, functional, technological, which

¹ Ivanovo State Power University named after V. I. Lenin
kafsu@su.ispu.ru; tverskkoj@mail.ru

are associated with the features of the process of mixture formation and combustion of fuel in the combustion chamber, the design and physical characteristics of installations, and the features of thermal circuits of power units, are considered. The methodological foundations of the structural synthesis of effective automatic control systems for gas turbine power plants are shown.

Key words: process control system, effective control, structural synthesis, steam-gas technology, gas turbine unit, combustion chamber, generalized thermodynamic analysis

Ведение

Современные энергоблоки, построенные на базе парогазовых технологий, существенно поднимают эффективность использования топливно-энергетических ресурсов (расчетные оценки КПД энергоблоков ПГУ составляют более 50–60%). Высокий уровень эффективности ПГУ достигается путем совместного использования высокотемпературного цикла Брайтона в газотурбинной установке (ГТУ) и низкотемпературного цикла Ренкина в паровой турбине (ПТ). Передача энергии между циклами осуществляется посредством котла-утилизатора (КУ). Для обеспечения эффективности бинарного цикла в целом прежде всего требуется согласовать противоречивые режимные условия: формирование теплового потока перед КУ предпочтительно на максимально достижимом текущем уровне, недопущение в динамических процессах низких температур потока газов на входе в КУ и высоких температур на входе в газовую турбину (ГТ), которые существенно снижают ее ресурс [1,2,3].

Одним из ключевым элементом ГТУ является камера сгорания (КС). Рабочим телом КС служит воздух, к которому подводится тепло за счет сжигания в нем определенного количества топлива. Кинетическая модель воспламенения и горения метана и пропана в кислороде/воздухе представляет собой экзотермическую реакцию, идущую с выделением теплоты. В общем случае процесс воспламенения и горения содержит 598 обратимых реакций с участием 92 компонентов, включает как низко-, так и высокотемпературный механизм окисления [4,5,6]. При этом фактор эффективности ГТУ связан, во-первых, с критичностью цикла Брайтона к изменениям температуры окружающей среды, а,

во-вторых, с процессом формирования воздушного потока, в среду которого осуществляется впрыск топлива.

В аспекте синтеза эффективной САУ соотношение массовых расходов топлива/газа и окислителя/воздуха на входе в КС ГТУ в каждый текущий момент времени должно соответствовать заданному согласно принятого способа сжигания и быть инвариантным к изменениям ее нагрузки. При этом переходные процессы, обеспечивающие эффективное горение, должны иметь монотонный характер вне зависимости от величины возмущений [7].

Особенности типовых решений

В настоящее время в структурном построении САУ ГТУ применяют известную формулу «ТОПЛИВО-ВОЗДУХ» [1,2].

1. Регулятор подачи топлива (РТ) в КС, выполненный по схеме стабилизатора с командным сигналом от регулятора мощности (РМ), не учитывает технологические ограничения по расходу окислителя/воздуха, а это ведет к потере живучести системы на границе эффективного режима. Например, с ростом температуры внешней среды практически на всех типах ГТУ входной направляющий аппарат (ВНА) компрессора выходит на ограничение ($\alpha_{\text{ВНА}} = 100\%$) и дальнейшее увеличение расхода топлива РТ по командному сигналу от РМ ГТУ ведет к растягиванию области горения, вовлечению в процесс дожигания топлива охлаждающего воздуха и неконтролируемый рост температуры газов на входе в ГТ (параметр косвенного измерения). Очевидно, что это нарушает температурный режим работы ГТ, ведет к периодическому перегреву лопаток ГТ и снижению их ресурса в условиях длительной эксплуатации.

2. Регулятор воздуха (РВ), выполненный по схеме с жесткой обратной связью по положению ВНА компрессора, не контролирует непосредственно расход воздуха и изменения окислителя, в том числе от вариаций параметров внешней среды. Поэтому требование поддержания теоретически необходимого массового расхода воздуха по отношению к массовому расходу подаваемого в КС топлива **не выполняется**. Как следствие, имеет место нестабильное поведение потока массового расхода воздуха, что влияет на изменение производительности компрессора и, соответственно, на изменение потенциальной

энергии давления на входе в КС. Возникающий дисбаланс между заданным РМ ГТУ расходом топлива и необходимым для горения массовым расходом воздуха влечет за собой нестабильность всего вектора выходных параметров установки, в том числе мощности ГТУ. Возникающие при этом дополнительные потери в выработке электроэнергии покрываются за счет увеличения расхода топлива. Поэтому экономическая и экологическая эффективность, надежность и общий ресурс ГТУ падают, а механическая энергия, затрачиваемая на привод компрессора, увеличивается.

3. При сжигании газа с большими избытками воздуха имеет место сжигание, при котором окислы азота (NO_x) в большей своей части образуются из соединения азота и кислорода воздуха и существенно превышают предельно допустимые концентрации. Поддержание предельно малых избытков воздуха в КС при построении САУ по формуле «ТОПЛИВО-ВОЗДУХ» и отсутствии непосредственного контроля параметров качества горения в КС, согласно принципа двухканальности Б.Н. Петрова, физически нереализуемо вследствие существенно большей инерционности канала с ВНА компенсации внешнего контролируемого возмущения относительно регулирующих клапанов (РК) подачи газа [2,8].

Суть проблем эффективного управления

В аспекте задачи структурного синтеза системы эффективного управления ГТУ выявлены следующие достаточно противоречивые проблемы, требующие совместного решения.

Первая проблема наблюдаемости и управляемости вытекает из свойства переопределенности технологического объекта управления (ТОУ) и связана с обоснованием информационной эффективности управляемых параметров и управляющих воздействий [9]. При этом обратим внимание, что управляющие воздействия имеют существенно разные динамические свойства:

– подачи топлива в КС ($B_T - Q_{\text{КС}}$) с малоинерционными регулирующими клапанами тонкого регулирования расхода газа;

– подачи воздуха, нагнетаемого компрессором в КС ($G_m - Q_{\text{КС}}$) с инерционными ВНА компрессора, динамические свойства которого определяются вращающейся массой роторов компрессора, ГТ и генератора, объединенных, как правило, единым валом.

Суть проблемы заключается в том, что динамическая несогласованность управлений потоками топлива и воздуха ведет к появлению циклических *температурных колебаний* в газовом потоке на входе в ГТ, температурным повреждениям (пережог) лопаток газовой турбины и снижению эксплуатационной надежности металла лопаток ГТ.

Вторая проблема климатическая связана с критичностью работы ГТУ к изменениям нагрузки и параметров внешней среды, которые существенно влияют на динамические особенности осевого компрессора, камеры сгорания и температурного режима газовой турбины, что требует:

– *обеспечения эффективности КС* – полноты сгорания топлива с незначительными выбросами оксидов азота NO_x , которая связана с температурой пламени и с временем нахождения газов при этой температуре, а также с качеством сжигаемого топлива, принципом организации процесса горения в КС ГТУ и **способом управления процессом** [10];

– обеспечения экономичности бинарного цикла в целом, которая связана с противоречивыми требованиями ограничения высоких температур газов на входе в ГТ и ограничения низких температур на входе в КУ.

Третья проблема конструктивная (по Гальперину И.И.) связана с физическими особенностями компрессора и силовой турбины с генератором, находящихся на одном валу, свойствами вращающихся масс, определяющих колебательный характер вращающейся системы как технологического объекта управления, и структурную устойчивость САУ [11].

Четвертая проблема функциональная характеризуется тем, что скорость вращения компрессора функционально связана с изменениями f_c частоты сети, т. е. при изменении частоты сети изменяется объем нагнетаемого воздуха. Например, при увеличении частоты частотный корректор формирует командный сигнал на РМ ГТУ и далее на РТ на уменьшение подачи топлива. Однако в связи с тем, что частота выросла, скорость вала компрессора увеличилась, что в начальный момент переходного процесса ведет к увеличению подачи

воздуха в КС. Иными словами, увеличение в начальный момент переходного процесса расхода окислителя и уменьшение расхода топлива ведет к снижению температуры горения и может привести к срыву пламени и аварийному останову ГТУ [12].

Пятая проблема технологическая связана с особенностями тепловых схем энергоблоков с ПГУ, обладающих существенной аккумулярующей способностью рабочего тела в утилизационной части блока и разную маневренность при наборе и сбросе нагрузки, а также с **парадигмой** «глубокого регулирования» ГТУ при их участии в ОПРЧ/НПРЧ. Это ведет к проявлению нелинейных свойств сложного объекта управления, существенному снижению его КПД и ресурса.

ОСНОВНОЙ РЕЗУЛЬТАТ

1. **Проблема наблюдаемости** объекта управления решается средствами методологии феноменологической термодинамики необратимых процессов. При этом обобщенный термодинамический анализ эффективности процесса выполняют в режимном аспекте, а объект управления представляют в виде модели «вход-выход», структурированной в соответствие с принципом необходимого разнообразия У. Эшби (путем выделения эффективных параметров и параметров, отнесенных к ограничениям) [13-15].

Термодинамические координаты - эффективные параметры изделя как объекта управления, обеспечивающие его наблюдаемость. Например, объемный и массовый расходы воздуха, массовый расход топлива, температуры распределенного процесса, а также ряд новых показателей, характеризующих, в частности, **кинетическую энергию вращения** общего вала компрессора и газовой турбины с генератором.

2. **Проблема конструктивная** связана с физическим свойством вращающейся системы (ротор компрессора, газовой турбины и генератора), представляющей собой вращающуюся систему, которая обладает определенной кинетической энергией вращения:

$$dA = d \left(\frac{J\omega^2}{2} \right), \text{ Дж}$$

где J – момент инерции системы, $\text{Нм} \cdot \text{с}^2$; ω – угловая скорость вращения системы, $1/\text{с}$.

Особенности вращающихся масс определяют колебательный характер технологического объекта управления и структурную устойчивость системы. Поэтому требуемая управляемость может быть достигнута путем структурного синтеза иерархической САУМ, в которой на базовом уровне формируется некий эквивалентный объект локального управления с желаемыми динамическими свойствами (стабилизатор кинетической энергии вращения объединенного вала ГТУ), в структуру которого по результатам обобщенного термодинамического анализа вводится дополнительный элемент в виде скоростной квадратичной отрицательной обратной связи [8,16,17].

3. **Проблема технологическая** для энергоблоков с ПГУ, которые имеют разную маневренность при наборе и сбросе нагрузки, требует исключить «глубокое регулирование» мощности ГТУ. При этом дополнительный резерв участия энергоблоков ТЭС (ПГУ) в поддержании общесистемных параметров (НПРЧ) легко может быть сформирован путем участия в регулировании как можно большего числа энергоблоков, каждый из которых в соответствии с предварительным диспетчерским графиком (ПДГ) несет активную нагрузку с оптимальным КПД в пределах индивидуального регулируемого диапазона. Такой подход позволяет минимизировать величину внешнего контролируемого возмущения по нагрузке, приходящееся на отдельный энергоблок.

Совместное решение комплекса обозначенных проблем средствами САУМ ГТУ позволит в условиях максимально достижимой эксергии улучшить динамические свойства управления активной мощностью бинарного энергоблока при участии в ОПРЧ/НПРЧ и поддерживать при этом его соответствующую эффективность, в том числе живучесть при технологических и режимных ограничениях, соответственно продлить физический ресурс ГТУ.

Список литературы

1. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учеб. пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2002.
2. Тверской, Ю.С. Локальные системы управления. Введение в многофункциональные АСУТП электростанций: учебник. – 2-е изд., испр. и доп. – СПб.: Лань, 2024.

3. Tverskoy Yu. S., Muravev I.K. Optimization of controlled processes in combined-cycle plant (new developments and researches) // Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017) 12290.

4. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1973.

5. Кулешов П.С., Старик А.М., Титова Н.С. Кинетика окисления и горения метана и пропана // Неравновесные физико-химические процессы в газовых потоках и новые принципы организации горения / Труды ЦИАМ № 1348. / под ред. А. М. Старика. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – С. 53–87.

6. РТМ 108.022.11-83. Установки газотурбинные и парогазовые. Проектирование камер сгорания.

7. СТО 59012820.27.100.004-2016. Нормы участия парогазовых и газотурбинных установок в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности // СО. – М.: СО ЭЭС, 2016. – 30 с. (с изм.27.03.2020).

8. Тверской Ю.С., Гайдина Ю.А., Перцев А.В. О системах управления газомазутных энергоблоков // Электрические станции. – 2022. – № 11. – С. 12–20.

9. Воронов А.А. Введение в динамику управляемых систем. – М.: Наука, 1985.

10. Муравьев И.К., Шинкевич Д.А. Моделирование работы газотурбинной установки SGT5-4000F с исследованием влияния режимных и климатических факторов на устойчивость горения в камере сгорания / Вестник ИГЭУ. – 2024. – Вып. 1. – С. 12–19.

11. Гальперин И.И. Динамические системы. – М.: Энергия, 1970.

12. L. Meegahapola and D. Flynn. Characterization of gas turbine lean blowout during frequency excursions in power networks // IEEE Power Energy Society General Meeting. – Vol. 30. – Is. 4. – July 2015. – P. 1877–1887.

13. Вейник А.И. Теория движения. – Мн.: Наука и техника, 1969.

14. Бурдаков В.П., Данилов Ю.И. Физические проблемы космической тяговой энергетики. – М.: Атомиздат, 1969.

15. Tverskoi D.Yu. A generalized thermodynamic analysis of the efficiency of coal-pulverization systems // Thermal Engineering. – 2010. – Т.57. – № 8. – Р. 682–688.

16. Тверской Ю.С., Муравьев И.К., Тверской Д.Ю., Гайдина Ю.А. К вопросу структурного синтеза эффективных систем управления технологическим процессом // Датчики и системы. – 2022. – № 6. – С. 20–32.

17. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: В 5 т. – 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. Н.Д. Егупова, К.А. Пупкова. – Т. 3. Синтез регуляторов систем автоматического управления. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.

УДК 621.1

Шемякин А.О.

**МЕТОДИКА РАЗРАБОТКИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ
ПРОГРАММИРУЕМЫХ ЛОГИЧЕСКИХ КОНТРОЛЛЕРОВ
БИБЛИОТЕК ДЛЯ СИСТЕМЫ ЧИСЛОВОГО
ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ “АКСИОМА КОНТРОЛ”¹**

Аннотация

В статье представлена методика разработки специализированных ПЛК библиотек на языке FBD для системы ЧПУ "АксиОМА Контрол". Описан подробный процесс разработки специализированных библиотек с использованием SOFT PLC.

Ключевые слова: ПЛК, методика, разработка библиотек, АксиОМА Контрол, язык функциональных блоков

¹ Московский государственный технологический университет «СТАНКИН». Кафедра компьютерных систем управления Москва, Россия E-mail: shemlego2013@mail.ru телефон: +79259043426

Shemiakin A.O.

METHODIC OF DEVELOPMENT OF SPECIALIZED PROGRAMABLE LOGIC CONTROLLERS LIBRARIES FOR THE “AXIOMA CONTROL” COMPUTER NUMERICAL CONTROL SYSTEM¹

Abstract

The article presents a methodology for developing specialized PLC libraries in the FBD language for the “AksiOMA Control” CNC system. The detailed process of developing specialized libraries using SOFT PLC is described. The methodology allows optimizing the process of creating control programs for computer numerical control machines.

Keywords: PLC, methodology, library development, AksiOMA Control, FBD

Аннотация:

Цель данного исследования заключается в разработке инновационной методики создания специализированных ПЛК библиотек на языке функциональных блоков (FBD) для современной системы числового программного управления “АксиОМА Контрол”. Актуальность данного исследования обусловлена растущей потребностью в оптимизации процессов программирования промышленного оборудования и повышении эффективности разработки управляющих программ.

Предлагаемая методика представляет собой комплексный алгоритм, который позволяет систематизировать и упорядочить процесс разработки специализированных библиотек при использовании профессионального программного обеспечения AxiOMA Control FBEditor. Данный редактор, разработанный МГТУ Станкин, является ключевым инструментом в процессе создания управляющих программ для различного промышленного оборудования.

¹ Moscow State Technological University “STANKIN” Department of numerical control systems Moscow, Russia E-mail: shemlego2013@mail.ru phone: +79259043426

В рамках исследования особое внимание уделяется интеграции с SOFT PLC - программным симулятором программируемого логического контроллера, который обеспечивает возможность тестирования разработанных библиотек в виртуальной среде перед их непосредственным внедрением в производственный процесс. Важным компонентом методики является использование испытательного стенда, полностью совместимого с системой ЧПУ “АксиОМА Контрол”, что позволяет проводить полноценную отладку и верификацию разработанных библиотек.

Разработанная методика включает в себя следующие ключевые этапы:

1. Определить функционал разрабатываемой библиотеки
2. Собрать/подобрать готовый стенд для отладки разрабатываемой программы (пример на рис.1)
3. Разработать программу для теста работоспособности всех компонентов системы
4. Протестировать работоспособность системы при помощи тестовой программы
5. Разработать саму библиотеку (пример библиотеки на рис. 2)
6. Разработать программу, тестирующую функции библиотеки
7. Протестировать библиотеку на стенде.

Практическая значимость исследования заключается в создании универсального инструментария для разработчиков систем ЧПУ, который позволяет существенно сократить время на разработку управляющих программ и повысить качество конечного продукта.

Методика может быть успешно применена при создании библиотек для различных типов промышленного оборудования, включая станки с числовым программным управлением, роботизированные комплексы и другие автоматизированные системы.

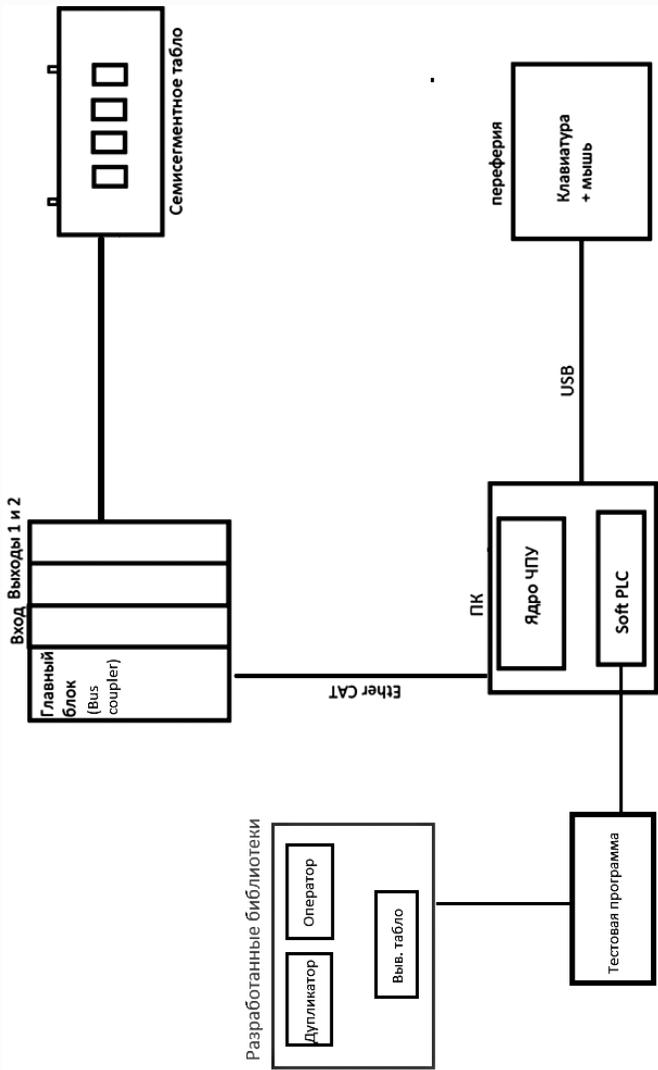


Рис. 1. Структурная схема испытательного стенда

Библиотека вывода цифр от 0 до 9 В табло

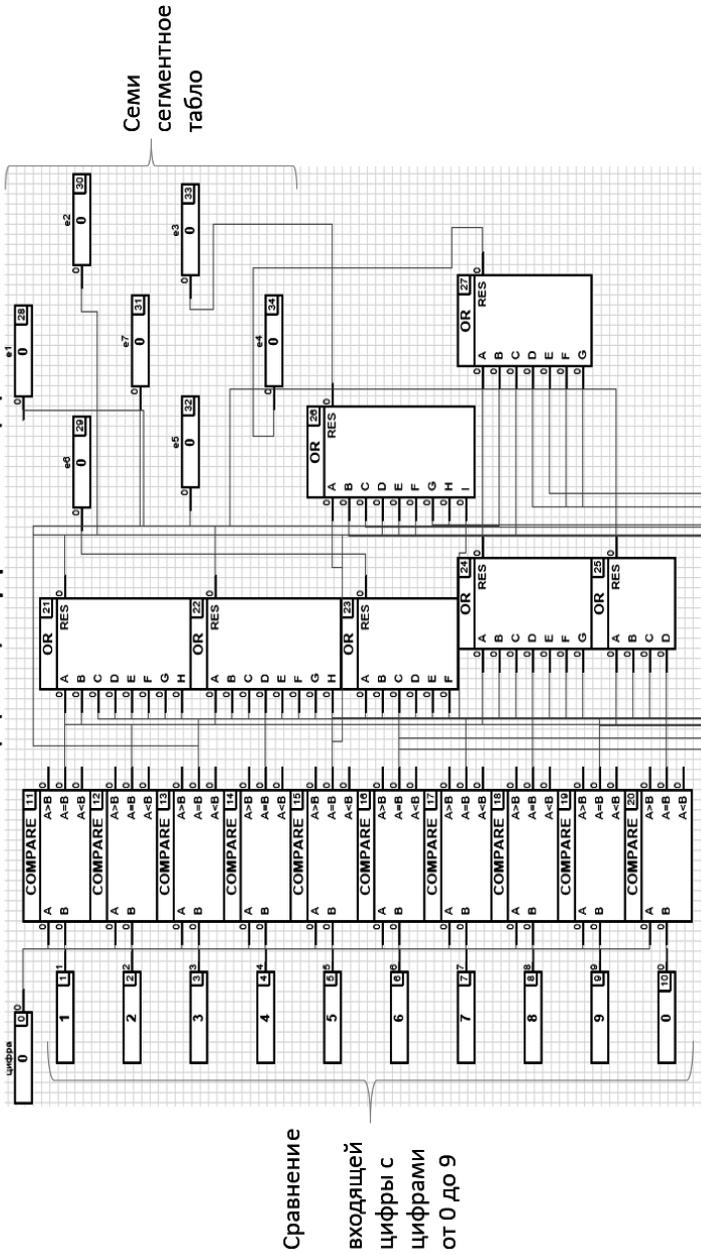


Рис. 2. Разработанная библиотека

Особое внимание в исследовании уделяется вопросам оптимизации процесса разработки, включая автоматизацию рутинных операций и стандартизацию подходов к созданию функциональных блоков. Разработанная методика предусматривает возможность масштабирования и адаптации под конкретные задачи производства, что делает её универсальным инструментом для решения широкого спектра инженерных задач.

Внедрение предложенной методики позволяет достичь следующих преимуществ:

- Сокращение времени на разработку управляющих программ
- Повышение качества и надежности программного обеспечения
- Унификация подходов к созданию библиотек FBD для данной

СЧПУ

- Снижение вероятности ошибок при программировании

Полученные результаты исследования имеют практическую значимость для предприятий, использующих системы ЧПУ “Акси-ОМА Контрол”, и могут быть успешно применены при модернизации существующих производственных линий или при создании нового оборудования. Методика может служить основой для дальнейшего развития технологий программирования промышленных систем управления и создания новых решений в области автоматизации производства.

Список литературы

1. Никишечкин А.П. Анализ и синтез релейно-контактных схем: учеб. пособие. – М.: МИИТ, 2011.

2. Митин Г.П., Хазанова О.В. Системы автоматизации с использованием программируемых логических контроллеров: учеб. пособие. – М.: ИЦ МГТУ “Станкин”, 2005.

3. Никишечкин А.П., ГуаньшаньЮэ, Юйхань Инь. Рекомендации по выбору генерирующих соотношений в планах дробного фактора эксперимента // Вопросы науки. – 2022. – №2. – С. 7–13.

4. Юдицкий С.А., Магерут В.З. Логическое управление дискретными процессами. Модели, анализ, синтез. – М.: Машиностроение, 1987.
5. Юдицкий С.А., Тагаев А.А., Ефремов Т.К. Проектирование дискретных систем автоматики. – М.: Машиностроение, 1980.
6. Шишов, О. В. Технические средства автоматизации и управления: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2021.
7. Конюх В.Л. Проектирование автоматизированных систем производства: учеб. пособие. – М.: ООО "КУРС", 2019.
8. Кангин, В. В. Разработка SCADA-систем: учеб. пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2019.
9. Юсупов Р.Х. Основы автоматизированных систем управления технологическими процессами: учеб. пособие. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2018.
10. Елизаров И.А. Технические средства автоматизации. Программно-технические комплексы и контроллеры: выставочные материалы.