

На правах рукописи



Муравьев Игорь Константинович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ГАЗОТУРБИННЫМИ УСТАНОВКАМИ ЭНЕРГООБЛОКОВ
ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ РЕЖИМНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРАХ**

Специальность: 05.13.06 –
Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (промышленность)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2016

Работа выполнена на кафедре «Системы управления» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Тверской Юрий Семенович**

Официальные оппоненты:

Аракелян Эдик Койрунович – доктор технических наук, профессор, НИУ «Московский энергетический институт», профессор кафедры «Автоматизированные системы управления тепловыми процессами»

Коростелев Владимир Федорович – доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых», заведующий кафедрой «Автоматизация технологических процессов»

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Всероссийский дважды ордена Трудового Красного Знамени Теплотехнический научно-исследовательский институт» (ОАО «ВТИ»), г. Москва.

Защита состоится 9 декабря 2016 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.02 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус Б, ауд. Б-237.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, ученый совет ИГЭУ.

Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Muravev_I.K..pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.064.02

кандидат технических наук, доцент



Сидоров Сергей Георгиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное развитие многофункциональных АСУТП на базе ПТК направлено на повышение уровня автоматизации и интеллектуализации выполняемых системой функций, что требует более полного учета изменяющихся режимных и разного рода внешних факторов, влияющих на технико-экономическую эффективность оборудования. Решение этой проблемы особенно актуально для энергоблоков ПГУ, расчетные значения КПД которых могут составлять 50-60%. Однако опыт эксплуатации, экспериментальные исследования показывают, что в условиях реальной эксплуатации эффективность использования топлива весьма чувствительна к изменениям нагрузки энергоблока и температуры внешней среды. При этом фактические значения КПД ПГУ могут изменяться в широком диапазоне и падать вплоть до значений паросиловых энергоблоков.

Степень разработанности проблемы эффективности ПГУ определяется прежде всего работами ведущих организаций страны (ОАО «ВТИ», ОАО «Фирма ОРГРЭС», НИУ «МЭИ», АО «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ», УГАТУ, ИГЭУ и др.), а также зарубежными компаниями (Siemens Aktiengesellschaft, Alstom, Mitsubishi Heavy Industries, General Electric и др.), которые ведут интенсивные исследования по решению задач управления работой газотурбинных двигателей, маневренности ПГУ при участии в регулировании общесистемных параметров, оценке влияния климатических факторов, разного рода технологических ограничений и др. Большое внимание при этом уделяется синтезу САУ газотурбинными двигателями. Однако, как показали результаты анализа проведенных патентно-информационных исследований, задачи поиска факторов, влияющих на потерю эффективности инновационного оборудования, обоснование путей и методов достижения расчетной (проектной) эффективности автоматизированного объекта в широком диапазоне нагрузок и изменяющейся температуры внешней среды до сих пор оставались не решенными. Поэтому совершенствование многофункциональных АСУТП энергоблоков путем более полного учета режимных и внешних климатических факторов представляется актуальным и своевременным направлением освоения инновационного оборудования.

Работа выполнялась на кафедре систем управления ИГЭУ в соответствии с планами НИР университета по научному направлению «Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП электростанций» при поддержке грантов «Обобщенный термодинамический анализ эффективности энергоблоков ПГУ» (2012), «Исследование влияния определяющих факторов, характеризующих эффективность работы блоков ПГУ при изменяющихся внешних и режимных условиях» (2015) и гранта РФФИ «Развитие технологических основ и способа оптимизации эффективности парогазовых технологий» (Проект №15-48-03215 конкурса РФФИ 2015-2016 гг.).

Цель работы – повышение эффективности ПГУ энергоблоков с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов путем совершенствования систем управления газотурбинных установок.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие **задачи**.

1. Анализ современной технологии создания многофункциональных АСУТП и определение путей и методов их совершенствования.

2. Развитие методов обобщенного термодинамического анализа эффективности тепломеханического оборудования (ТМО) энергоблока в аспекте теоретического обоснования вектора управляемых координат ТОО с целью структурного синтеза САУ подачи топлива и воздуха в ГТУ.

3. Разработка всережимной математической и имитационной моделей ГТУ и ПГУ, включая расчет показателей технической эффективности ТМО, и методики ее многопараметрической настройки при изменяющихся внешних и режимных условиях.

4. Оценка меры адекватности математической модели в рабочем диапазоне нагрузок энергоблока и исследование влияния определяющих режимных и внешних климатических факторов на его эффективность. Разработка алгоритмических основ функции информационной поддержки оперативного управления.

5. Разработка способа управления мощностью ГТУ энергоблока ПГУ при изменяющихся внешних климатических и режимных условиях.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в работе использовались методы теории автоматического управления, обобщенного термодинамического анализа, тепломассообмена, математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Научная новизна работы.

1. Разработан способ управления мощностью ГТУ энергоблока ПГУ при изменяющихся внешних климатических и режимных условиях путем стабилизации массового расхода воздуха на заданном уровне и соответствующей коррекции теплового потока за ГТУ путем изменения подачи топлива в камеру сгорания газовой турбины.

2. Разработаны устройство регулирования массового расхода воздуха в компрессор ГТУ и АСР мощности ГТУ энергоблока (подачи воздуха в компрессор и топлива в камеру сгорания ГТУ) и методика ее настройки.

3. Впервые дано теоретическое обоснование вектора управляемых координат ПГУ путем развития методики обобщенного термодинамического анализа эффективности тепломеханического оборудования энергоблоков.

4. Разработана нелинейная (всережимная) математическая модель энергоблока ПГУ, реализованная в виде открытого полимодельного комплекса с инвариантной и варьируемой частями, отличающаяся тем, что модель позволяет исследовать влияние изменяющихся внешних и режимных факторов на параметры энергоблока, в том числе технико-экономические и новые комплексированные показатели вектора управляемых координат сложного объекта управления.

5. Разработана методика оценки меры адекватности нелинейных математических моделей (полимодельных комплексов) с использованием реальных трендов из архива АСУТП энергоблока в широком диапазоне нагрузок и изменяющихся внешних климатических факторах.

Практическая значимость результатов.

1. Разработаны имитационная модель ПГУ энергоблоков и методика настройки полимодельного комплекса ПГУ при изменяющихся внешних климатических и режимных условиях, отличающаяся тем, что в процессе настройки модели уточняются параметры изменяемой (варьируемой) части, а ее инвариантная часть остается без изменений. Модель представляет собой автоматизированную систему постановки вычислительных экспериментов, что суще-

ственно сокращает время настройки сложных многопараметрических моделей на конкретный тип оборудования ПГУ энергоблока.

2. Разработанные математическая и структурированная имитационная модели энергоблоков (ПГУ-325 и ПГУ-450) используются в учебном процессе при выполнении курсовых и научно-исследовательских работ по дисциплинам: «Технология создания АСУТП», «Локальные системы управления», «Обобщенный термодинамический анализ эффективности технических систем», «Междисциплинарный проект», а также выпускных квалификационных работ бакалавров и магистерских диссертаций.

Автор защищает:

- результаты обобщенного термодинамического анализа в аспекте решения физических проблем структурного синтеза САУ;
- всережимную динамическую математическую и имитационную модели ПГУ энергоблока с оперативным расчетом показателей технической эффективности и ее структурное построение;
- методику многопараметрической настройки нелинейной математической модели на заданный режим и оценки меры адекватности полимодельного комплекса при изменяющихся внешних и режимных условиях, результаты вычислительных экспериментов;
- способ стабилизации массового расхода воздуха на входе в компрессор ГТУ и результаты исследований эффективности управления ПГУ энергоблока.

Личный вклад автора.

Все результаты исследований, выносимые на защиту и изложенные в тексте диссертации, получены лично автором либо при его непосредственном участии. Анализ и обсуждение полученных результатов проведены автором совместно с научным руководителем.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается корректным применением методов теории автоматического управления, обобщенного термодинамического анализа, математического моделирования и вычислительного эксперимента, согласованностью результатов вычислительных экспериментов с данными промышленной эксплуатации.

Соответствие паспорту специальности. Работа соответствует паспорту специальности: *в части формулы специальности* – «...специальность, занимающаяся математическим, информационным, алгоритмическим ... обеспечением создания автоматизированных технологических процессов ... и систем управления ими, включающая методологию исследования и проектирования, формализованное описание и алгоритмизацию, оптимизацию и имитационное моделирование функционирования систем, внедрение, сопровождение и эксплуатацию человекомашинных систем»; *в части области исследования специальности* – пункту 4: «Теоретические основы и методы математического моделирования технологических систем и комплексов, функциональных задач и объектов управления и их алгоритмизация»; пункту 6: «Научные основы, модели и методы идентификации производственных процессов, комплексов и интегрированных систем управления»; пункту 15: «Теоретические основы, методы и алгоритмы интеллектуализации решения прикладных задач при построении АСУТП и др.».

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно-технических и научно-практических конференциях: «Моделирование – 2012» («SIMULATION – 2012») (Киев, 2012 г.), «Современные технологии в энергетике – основа повышения надежности, эффективности и без-

опасности оборудования ТЭС» (Москва, ВТИ, 2012 г.), «Энергия инновации – 2012, 2015» (Иваново), «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ, 2013 г.), «Состояние и перспективы развития электротехнологии» XVII, XVIII Бенардосовские чтения (Иваново, 2013, 2015 г.), «Математическое моделирование и информационные технологии» («Энергия – 2013, 2015, 2016») (Иваново), «Оптимизация и повышение эффективности работы ТЭС путем внедрения АСУТП» (Москва, ВТИ, 2014 г.), «Имитационное моделирование. Теория и практика» (ИММОД-2015) (Москва, ИПУ, 2015 г.), «Математические методы в технике и технологиях» (Санкт-Петербург, СГТУ, 2016 г.), а также на научных семинарах и заседаниях кафедры систем управления ИГЭУ.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 19 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах по списку ВАК, 1 патент РФ, 3 статьи в монографии «Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций», 7 статей в сборниках научных трудов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 155 наименований, и шести приложений. Общий объем диссертации составляет: основной текст – 148 страниц, в том числе рисунков 59, таблиц 12, список литературы на 19 страницах, приложения на 48 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования. Сформулированы цель и задачи исследований. Приведены общие сведения о структуре работы.

В первой главе приведены результаты патентно-информационных исследований, рассмотрены особенности технологии создания системообразующих многофункциональных АСУТП энергоблоков и управления газотурбинными двигателями (рис.1).

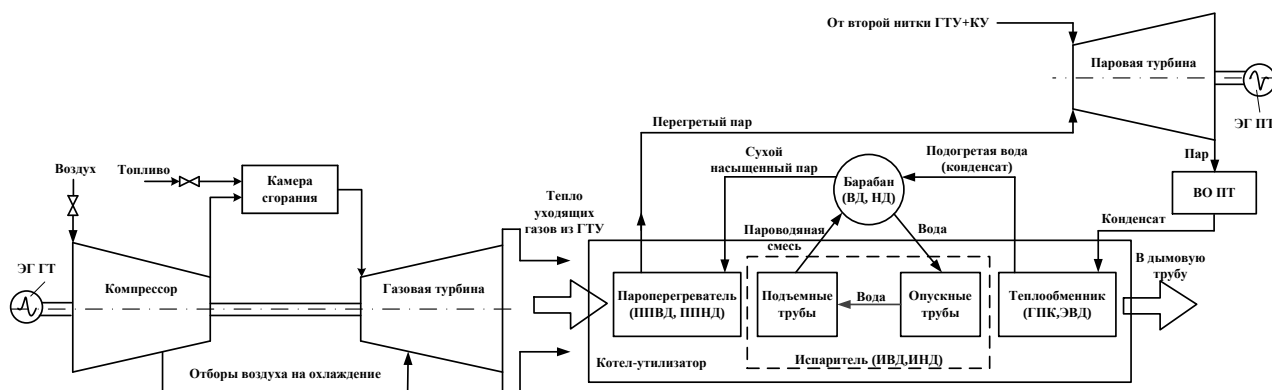


Рис.1. Принципиальная схема ПГУ энергоблока:

ГТУ – газотурбинная установка; ЭГ – электрогенератор; ГТ – газовая турбина; КУ – котел-утилизатор; ПТ – паровая турбина; ВД и НД – высокое и низкое давления соответственно; ВО – вспомогательное оборудование; ИВД – испаритель высокого давления; ИНД – испаритель низкого давления; ППВД и ППНД – пароперегреватели высокого и низкого давлений соответственно; ЭВД – экономайзер высокого давления; ГПК – газовый подогреватель конденсата

Показано, что систематизировать известные нормативно-технические документы (НТД) целесообразно в аспекте современной технологии АСУТП электростанций как методологической основы решения сложных междисциплинарных задач автоматизированного управления. Сформулирована общая постановка задачи исследования.

Вторая глава посвящена развитию методов обобщенного термодинамического анализа эффективности тепломеханического оборудования (ТМО) энергоблока ПГУ как сложного

технологического объекта управления (ТОУ), теоретического обоснования вектора управляемых координат сложного ТОУ и структурного синтеза САУ подачи топлива и воздуха в ГТУ энергоблока.

ПГУ энергоблока как комплекс взаимосвязанного оборудования включает следующее ТМО и протекающие в нем процессы: компрессор ГТУ (процесс сжатия воздуха, расчеты объема поступающего воздуха, распределения воздуха на охлаждения газовой турбины); камера сгорания ГТУ (химические процессы сжигания топлива, расчеты объема окислителя для топлива, параметров выходящих дымовых газов); газовая турбина ГТУ (процесс расширения дымовых газов, расчеты неконтролируемых и нерегулируемых «присадок» холодного воздуха из компрессора); котел-утилизатор (границы образования пароводяной смеси в поверхностях нагрева, рециркуляция конденсата, материальные балансы воды и пара в барабанах высокого и низкого давлений); паровая турбина (процесс расширения пара); конденсационная установка (процесс конденсации пара).

Методика обобщенного термодинамического анализа эффективности энергоблока сводится к следующему. Разрабатывается обобщенный потоковый граф работ и передаваемых энергий (рис. 2).

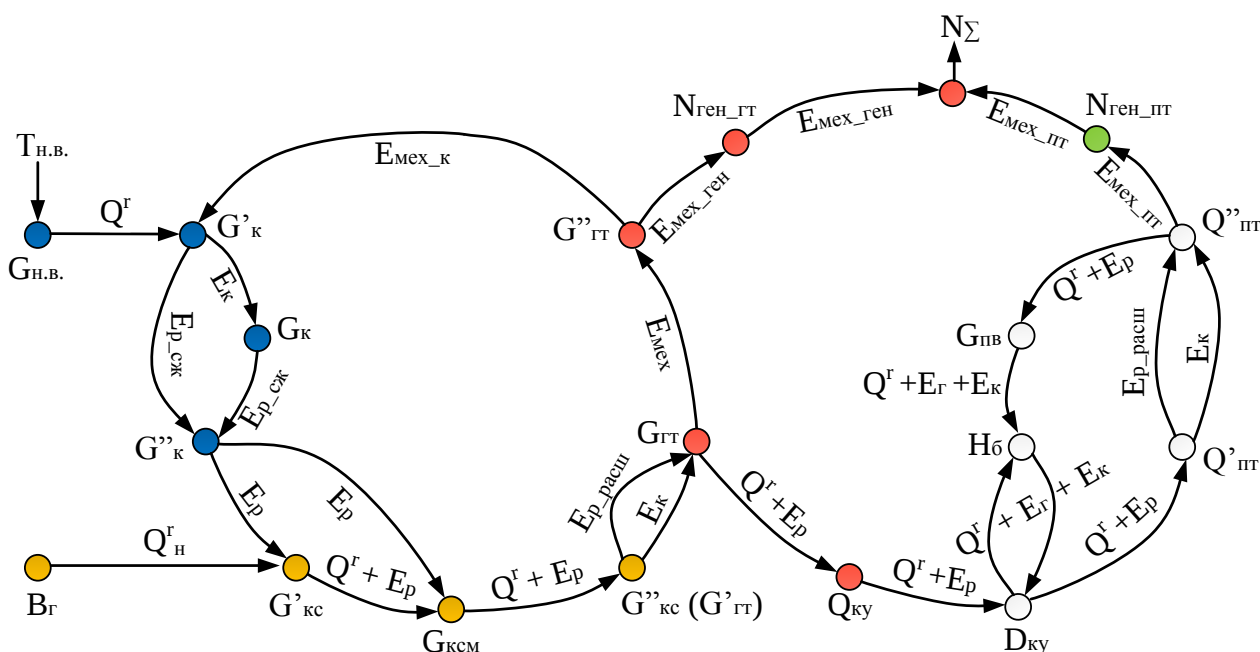


Рис. 2. Обобщенный потоковый граф работ и передаваемых энергий в ПГУ

Обозначено: $B_{\text{г}}$ – расход топлива; $T_{\text{н.в.}}$, $G_{\text{н.в.}}$ – температура и расход наружного воздуха соответственно; $G'_{\text{к}}$, $G''_{\text{к}}$ – расходы воздуха на входе и выходе компрессора соответственно; $G_{\text{к}}$ – расход воздуха в промежуточной точке компрессора; $G'_{\text{кс}}$, $G''_{\text{кс}}$ – расходы воздуха на входе и выходе камеры сгорания соответственно; $G_{\text{ксм}}$ – расход воздуха в камеру смешения; $G'_{\text{гт}}$, $G''_{\text{гт}}$ – расходы дымовых газов на входе и выходе газовой турбины соответственно; $G_{\text{гт}}$ – расход дымовых газов в промежуточной точке газовой турбины; $Q_{\text{ку}}$ – тепловой поток дымовых газов на входе в котел-утилизатор; $D_{\text{ку}}$ – расход пара; $G_{\text{пв}}$ – расход питательной воды; $N_{\text{б}}$ – уровень в барабане; $N_{\text{ген}}$ – электр. мощность генератора.

Проводится анализ физических работ совершаемых в ПГУ. Определяются основные потенциалы и обобщенные термодинамические координаты ПГУ как объекта управления.

Результаты обобщенного термодинамического анализа по определению обобщенных потенциалов и обобщенных координат ПГУ (ГТУ, КУ и ПТУ) как термодинамической системы сведены в таблицу (табл. 1).

Таблица 1. Обобщенные потенциалы и координаты ПГУ

№ п/ п	Вид работы	Обо- значе- ние	Потенциал		Координата		Примечание
			X_i	разм.	x_i	разм.	
1	2	3	4	5	6	7	8
1.	Работа изменения кинетической энергии	$A_{кин}$	$\frac{V_p}{2}$	$м^3$	$\frac{G_m^2}{\rho \cdot S_0^2}$	Па	Процесс изменения энергии воздуха на входе в компрессор
					$\frac{\rho \cdot G_v^2}{S_0^2}$		Процесс изменения энергии конденсата, воды, водопаровой смеси и пара
2.	Работа по преобразованию потенциальной энергии давления	$A_{пот}$	V_p	$м^3$	P	Па	Процесс сжатия воздуха в компрессоре и расширения газов в турбине
3.	Механическая работа вращения ротора	$A_{мех}$	$\frac{M_p \cdot D_p^2 \cdot \pi^2}{2}$	$кг \cdot м^2$	ν^2	$1/с^2$	
4.	Работа, связанная с изменением теплоты	$A_{терм}$	Q_n^p	Дж/кг	m_e	кг	Изменение теплоты внесенной с топливом: B_r , (кг/с) изменение m_r в единицу времени
			$c_e \cdot T_e$		m_e		Изменение теплоты внесенной с воздухом: G_m , (кг/с) изменение m_v в единицу времени
			$c_{e_zm} \cdot T_{e_zm}$		m_{e_zm}		Изменение теплоты выносимой из ГТ с продуктами сгорания: $G_{г_гт}$, (кг/с) изменение $m_{г_гт}$ в единицу времени

Показано, что обобщенными координатами служат режимные параметры энергоблока: давление в установке, расход топлива, а также обобщенные (комплексированные) показатели – массовый расход воздуха, квадрат частоты вращения ротора и др. Сформированные в виде соответствующих сигналов-параметров и/или сигналов-комплексов, эти показатели, представляют обоснованный вектор параметров переопределенного ОУ рассматриваемого класса.

Оценка экономической эффективности ТООУ в структуре АСУТП является одной из важнейших задач. Методика расчета КПД энергоблока с использованием методов обобщенного термодинамического анализа отличается, во-первых, наличием точных конструктивных данных по оборудованию энергоблока (диаметр и вес маховика компрессора); во-вторых, известными параметрами процессов (объемы воздуха - окислителя, охладителя/теплоносителя и проч.); в-третьих, учетом особенностей конструктивных решений по каждому из ОУ (расположение компрессора и турбины на одном валу), что заметно осложняет расчет КПД ГТУ. Аналитически по развиваемой методике определены значения КПД энергоблока и его технологических участков: ГТУ, КУ и ПТ, которые практически совпадают с экспериментальными значениями.

В третьей главе рассматриваются результаты разработки нелинейной математической и имитационной модели ПГУ.

При разработке математической модели применен феноменологический подход, который в своей теоретической основе базируется на законах сохранения неравновесной термодинамики и результатах обобщенного термодинамического анализа эффективности энергоблока ПГУ. Это позволило использовать фундаментальную физико-математическую основу и строго оценить влияние принимаемых допущений на качество конечного результата, определить дополнительные требования к разработке математической и имитационной моделей энергоблока по оперативным расчетам показателей технической эффективности и полного вектора управляемых координат. При этом уравнения состояния определяются конструктивными и режимными параметрами оборудования.

Уравнения, описывающие особенности протекающих в ГТУ процессов, как комплекса взаимосвязанного технологического оборудования, следующие:

$$\left\{ \begin{array}{l} G'_k = k \cdot \frac{p_\theta^*}{\sqrt{T_\theta^*}} \cdot q(\lambda_\theta) \cdot F_\theta \\ \frac{dT_{kc}}{dt} = \frac{G_{kc1} \cdot c''_\theta \cdot T''_\theta + B_\theta \cdot Q_{np} - (G_{kc1} + B_\theta) \cdot c''_{kc} \cdot T_{kc}}{M_{kc}} \\ \frac{dT'_z}{dt} = \frac{(G_{kc1} + B_\theta) \cdot c''_{kc} \cdot T_{kc} + (G_{cm} + G_{ob15}) \cdot c''_\theta \cdot T''_\theta - (G_{cm} + G_{ob15} + G_{kc1} + B_\theta) \cdot c'_z}{M_{kc}}, \\ Q''_{zm} = G''_{zm} \cdot c''_z \cdot T''_z \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{M_T - M_K - M_{BH} \cdot \omega^2 - M_{TP} \cdot \omega^2}{I_K + I_T} \\ \eta_{гту_эл} = \frac{E_{полез}}{E_{затр}} = \frac{E_{мех_зм} - E_{мех_к}}{E_{внутр_топл} + E_{мех_к}} \end{array} \right.,$$

где $k=0,0404 \text{ (кг} \cdot \text{К/Дж)}^{0,5}$ – размерный коэффициент, зависящий от показателя адиабаты и газовой постоянной воздуха; F_θ – площадь проточной части на входе в двигатель, м^2 ; $q(\lambda_\theta)$ – относительная плотность потока; T_θ^* – полная температура воздуха, К; p_θ^* – полное давление воздуха, Па; G_{kc} – расход воздуха в КС, кг/с; M_{kc} – термическая масса камеры сгорания, Дж/ $^\circ\text{C}$; T''_θ – температура воздуха на выходе компрессора, К; G_{ob15} – расход воздуха на охлаждение, отбираемый за 15 ступенью компрессора, кг/с; G_{cm} – расход воздуха на охлаждение температуры выхлопных газов на выходе из КС, кг/с.

Математическая модель энергоблока ПГУ, представленная в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния, реализована в виде полимодельного комплекса. Определяющее порядок модели общее число дифференциальных уравнений более 100. Дополнительно модель включает в себя расчет комплексированных параметров – тепловых потоков дымовых газов и массового расхода воздуха, поступающего в компрессор ГТУ, маховые моменты ротора компрессора и ГТ, а также оперативный расчет технико-экономических показателей эффективности (ТЭП) технологического оборудования (ГТУ, КУ, ПТ) и энергоблока.

Разработанная структура математической модели является открытой, то есть технология ее построения предусматривает возможность простых переходов от упрощенных структур к более полным. Модель структурирована путем выделения инвариантной и варьируемой частей для использования ее на разных блоках ПГУ при различном составе оборудования. Ма-

тематическая модель реализована с минимально заданной степенью сложности (использовано минимально необходимое число разбиений поверхностей нагрева на элементарные объемы). В работе рассмотрены математические модели отечественного энергоблока ПГУ-325 и, получившего широкое распространение, энергоблока ПГУ-450.

Разработка имитационной модели выполнена в открытой универсальной среде имитационного моделирования. Для решения систем дифференциальных уравнений выбран неявный метод Рунге-Кутты 2-го порядка с постоянным шагом интегрирования (рис. 3).

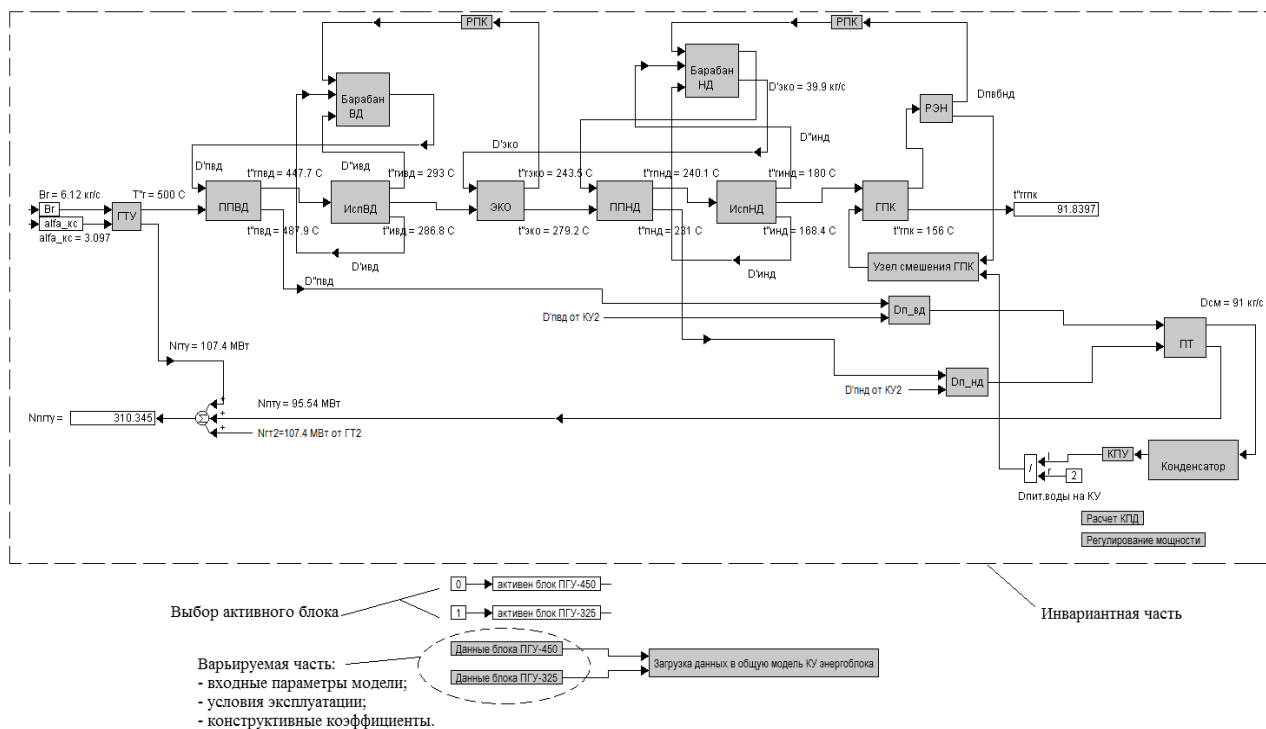


Рис. 3. Структура имитационной модели (комплекса) энергоблока ПГУ

Таким образом, разработана имитационная модель энергоблока ПГУ, отличающаяся тем, что обладает единой структурой с инвариантной и варьируемой частями. В целом многовариантная имитационная модель дает возможность организовать удобную среду для постановки вычислительных экспериментов для разных энергоблоков с ПГУ, что существенно сокращает время настройки модели на конкретный тип оборудования, и использовать ее на ранних стадиях проектирования (например, при проведении тендера по закупке ГТУ).

В четвертой главе разработана методика настройки полимодельного комплекса энергоблока с ПГУ на заданный режим, разработана методика оценки меры адекватности математической модели при изменяющихся режимных и внешних климатических условиях, проведено исследование влияния определяющих режимных и внешних климатических факторов на эффективность работы ПГУ энергоблока.

Методика настройки полимодельного комплекса ПГУ при изменяющихся внешних и режимных условиях отличается тем, что в процессе настройки модели уточняются параметры изменяемой (варьируемой) части модели, а ее инвариантная часть остается без изменений, а именно: уточняются начальные условия и коэффициенты модели, подстраиваются входные параметры модели, уточняются перепады давлений в поверхностях нагрева, корректируются начальные условия интегрирования, проверяются результаты модели в режиме,

соответствующему тепловому расчету (до и после изменяющихся внешних и режимных условиях), тестируются переходные процессы при изменении нагрузки.

Методика оценки меры адекватности нелинейных математических моделей (всережимных полимодельных комплексов) сводится к следующему (рис. 4).

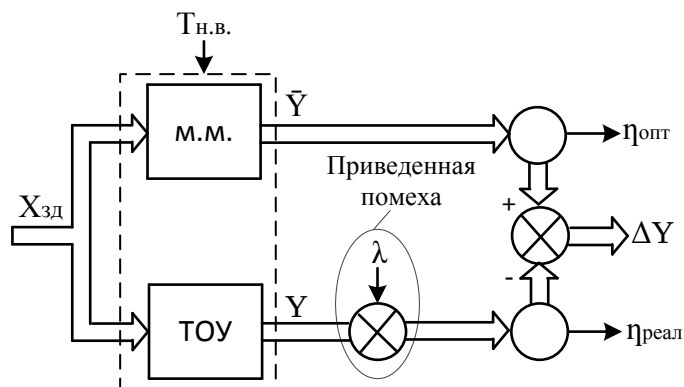


Рис. 4. К методике оценки адекватности технических решений

Шаг 1. Анализ соответствия по результатам тепло-гидравлического расчета с использованием статических данных, полученных по расчетам оборудования при нагрузке ГТУ 75% и 100% при температуре наружного воздуха -15°C ;

Шаг 2. Анализ соответствия по экспериментальным характеристикам с использованием трендов испытательного и эксплуатационного режимов из архива АСУТП при температуре наружного воздуха -15°C ; и на соответствие режимной карте при температуре наружного воздуха $+15^{\circ}\text{C}$ и $+30^{\circ}\text{C}$.

Количественная оценка меры адекватности определялась путем нахождения значений абсолютных и относительных погрешностей для определяющих параметров (табл. 2).

Таблица 2. Количественная оценка меры адекватности модели

№ п/п	Наименование параметра	Абсолютные максимальные отклонения	Максимальные относительные погрешности, %
1.	Электрическая мощность ГТУ	0,9 МВт	0,91
2.	КПД ГТУ	0,4%	0,88
3.	Температура пара контура ВД	$5,5^{\circ}\text{C}$	1,11
4.	Расход пара контура ВД	3,1 т/ч	2,18

План исследования влияния режимных факторов на параметры ПГУ сводится к сравнению результатов, которые были получены на модели с данными протоколов промышленной эксплуатации. В соответствии с протоколом эксплуатации на вход модели подавали реальные тренды из архива АСУТП энергоблока ПГУ-325. На выходе результаты модели сравнивались с выходными трендами из архива АСУТП ТОУ.

Анализ полученных результатов исследований показывает:

- электрическая мощность ГТУ, совпадает с эксплуатационным трендом достаточно точно;
- реальный тренд изменения температуры дымовых газов за турбиной является ограничивающим для результата, полученного на модели; объясняется требованием инструкций по надежности работы ГТУ;

- характер изменения температуры перегретого пара ВД в модели более динамичен, нежели реального тренда из архива АСУТП. Это можно объяснить тем, что, во-первых, в модели не учитывается инерционность датчика измерения температуры, а во-вторых, математическая модель КУ реализована с минимально заданной степенью сложности (использовано

минимально необходимое число разбиений поверхностей нагрева на элементарные объемы). Поэтому отклонение модельного значения температуры от эксплуатационного на величину 5°C не является критическим (существенного не влияет на конечный результат моделирования);

- коэффициент полезного действия ГТУ определен по нескольким известным формулам (по классической формуле (как отношение полезной работы к затраченной на ее производство энергии), по формуле НТД, заложенной в расчет ПТК АСУТП, и учитывающей температуру поступающего топлива). Результаты расчета КПД ГТУ практически совпадает с эксплуатационным трендом, что говорит о достаточно высоком качестве созданной математической модели.

Исследования влияния изменений температуры наружного воздуха на работу ПГУ выполнялись для полного диапазона нагрузок ГТУ (110, 97 и 75 МВт).

Установлено, что при изменении температуры наружного воздуха, например в сторону ее увеличения (от -5 до $+25^{\circ}\text{C}$) при заданном постоянном расходе топлива $6,44\text{ кг/с}$ и угла открытия ВНА равного -16 гр. (что соответствует нагрузке ГТУ 110 МВт), плотность забираемого воздуха снижается. Изменение плотности воздуха вызывает изменение его объемного и массового расходов на входе в компрессор. При этом массовый расход воздуха уменьшается, а объемный расход увеличивается; технологические параметры блока (температура уходящих газов за ГТУ, температура перегретого пара контура высокого давления и др.) отклоняются от расчетных и выходят за допустимые пределы: температура уходящих газов за ГТУ отклоняется на 45°C (рис. 5-а, график под номером 1), а температура перегретого пара контура высокого давления - на 40°C (рис. 5-б, график под номером 1).

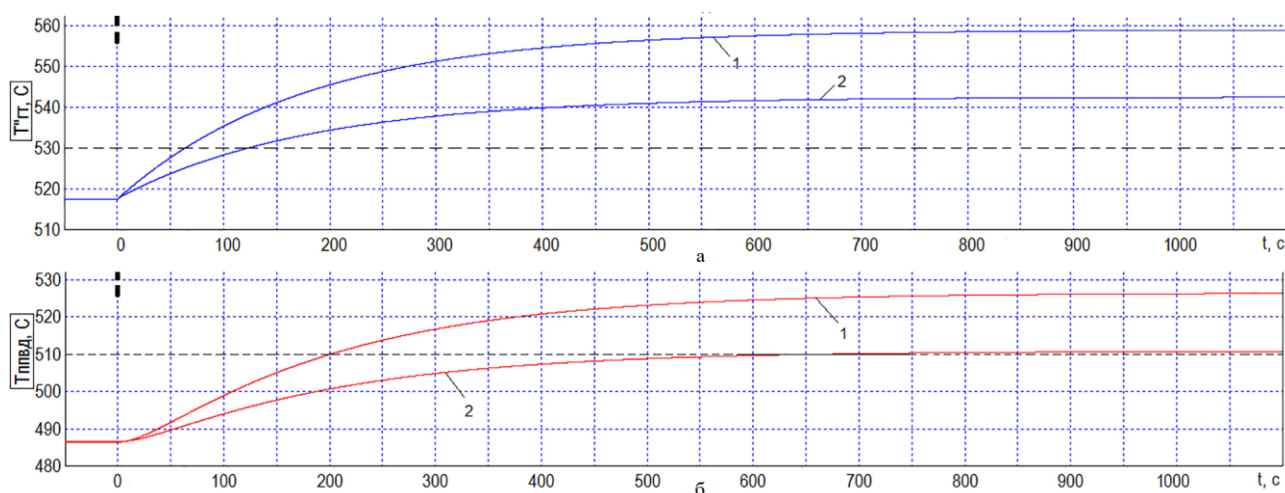


Рис. 5. Исследование эффективности управления энергоблоком ПГУ в зависимости от температуры внешней среды (в режиме полублока ПГУ-325):

1 – влияние Тн.в.; 2 – со стабилизатором по массовому расходу воздуха G_m ; а – температура уходящих (дымовых) газов за ГТ; б – температура перегретого пара контура ВД; параметры в прямоугольниках – параметры, значения которых находятся за пределами допустимых требований; вертикальные жирные пунктирные линии – момент нанесения внешнего возмущения; горизонтальные пунктирные линии – верхние границы технологически безопасных значений параметров.

Такие отклонения в эксплуатационных условиях требуют оперативного вмешательства в процесс управления энергоблоком. Проведенные поисковые исследования показали, что определяющим фактором в нарушении расчетного режима и разбалансировки параметров является неконтролируемое при естественных колебаниях температуры и давления наружно-

го воздуха «плавающее» изменение массового расхода воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, которое приводит к изменению фактического значения КПД энергоблока в достаточно широком диапазоне.

Результаты проведенных исследований показали, что использование разработанной математической и имитационной моделей энергоблоков с ПГУ перспективно для проведения экспертной оценки соответствия декларированной эффективности работы технологического оборудования (компрессора ГТУ) фактическим климатическим условиям эксплуатации на ранних стадиях проектирования ТЭС и закупки оборудования. Разработанная технология исследований может быть использована для проведения полноценной экспертизы теплоэнергетического оборудования с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов по местоположению станции. Показано, что математическая модель, выведенная на режим, соответствующий режимной карте, может использоваться также как диагностический инструмент для выявления текущих нарушений в работе энергоблока.

В пятой главе выполнено обобщение полученных результатов исследований, проведен анализ способов регулирования подачи топлива и воздуха в камеру сгорания ГТУ, разработан способ и система управления мощностью ГТУ энергоблока ПГУ.

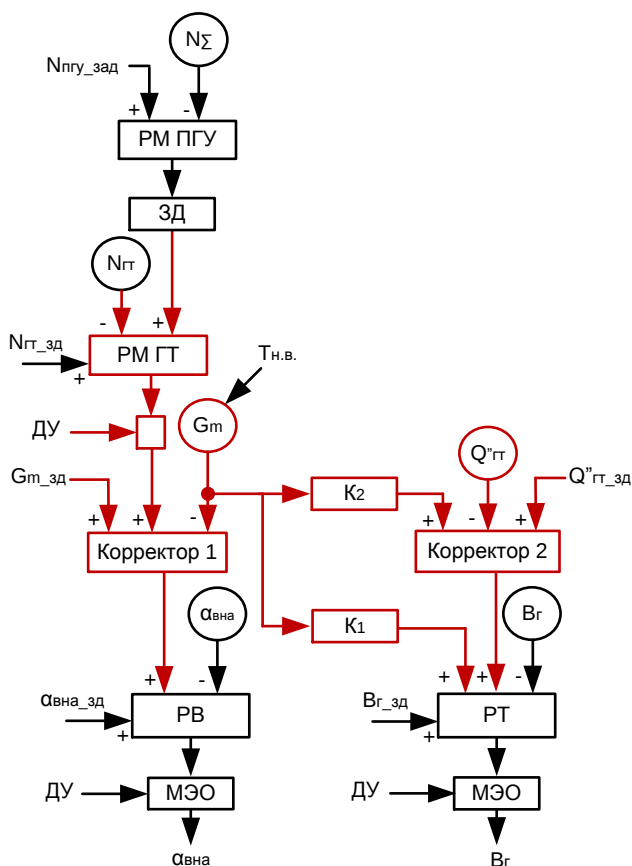


Рис. 6. Информационная структура способа регулирования мощности ГТУ (подачи воздуха в компрессор и топлива в КС)

теплового потока; УК – устройства компенсации; РВ – регулятор расхода воздуха; РТ – регулятор расхода топлива; МЭО – механизм электрический однооборотный; K_1 , K_2 – коэффициенты, определяющие соотношения «воздух – топливо» и «воздух – теплота за ГТ».

Рассмотрены все варианты возможных способов регулирования мощности ГТУ. Показано, что синтез АСР подачи воздуха и топлива по формуле «перевернутой» схемы «мощность – массовый расход воздуха – теплота – топливо» со стабилизацией массового расхода воздуха на входе в компрессор и коррекцией теплового потока за ГТ полностью удовлетворяет требованиям обобщенного термодинамического анализа эффективности сложной системы и наиболее полно учитывает исследуемые факторы.

Информационная структура «перевернутой» схемы способа регулирования мощности ГТУ энергоблока ПГУ имеет иерархическое построение, при котором регулятор мощности энергоблока (РМ ПГУ) выполняет задачи верхнего уровня САУМ (рис. 6).

Обозначено: ЗД – задатчик скорости нагружения ГТ; РМ ГТ – регулятор мощности газовой турбины; ДУ – дистанционное управление; корректор 1 – стабилизатор расхода воздуха; корректор 2 – корректор

Расчетная структура «перевернутой» схемы регулирования мощности ГТУ энергоблока ПГУ представляет собой САУ, в которой несколько взаимосвязанных контуров (рис. 7).

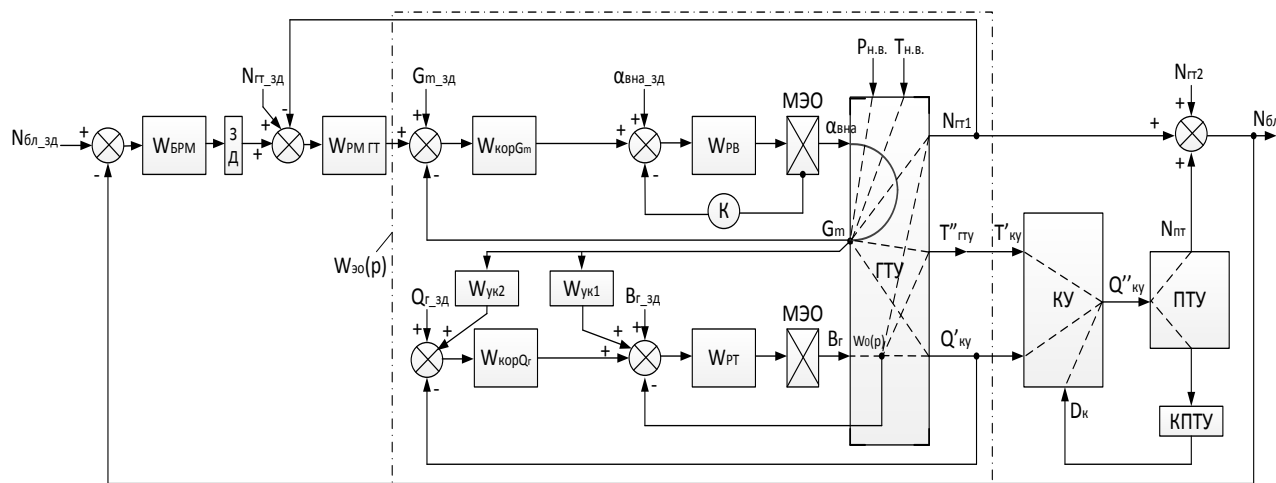


Рис. 7. Расчётная структура АСР мощности ГТУ энергоблока ПГУ

Заданная электрическая мощность ГТУ обеспечивается путем изменения массового расхода воздуха, поступающего в компрессор ГТ и соответствующей подачи топлива в КС. Способ регулирования расхода воздуха, подаваемого в КС ГТУ посредством компрессора, путем изменения угла открытия ВНА компрессора, отличается тем, что измеряют поступающий в компрессор массовый расход воздуха, который стабилизируют на заданном уровне, а скорость изменения угла открытия ВНА компрессора ограничивают максимально допустимой скоростью нагружения ГТ.

При этом для обеспечения эффективности утилизационной части блока тепловой поток уходящих дымовых газов за ГТ необходимо поддерживать предпочтительно на максимальном достижимом уровне путем коррекции расхода топлива в камеру сгорания ГТ. Значение уровня теплового потока определяется в зависимости от фактического массового расхода воздуха.

Исследования новых технических решений по АСР мощности выполнены на основе имитационной модели полимодельного комплекса энергоблока ПГУ-325. Разработана методика параметрической оптимизации АСР мощности ГТУ энергоблока ПГУ, в ходе которой определены параметры настройки регуляторов: угла открытия ВНА, корректора массового расхода воздуха, расхода топлива, корректора по теплоте дымовых газов на выходе ГТ, мощности ГТУ, блоков соотношений «массовый расход воздуха – теплота» и «массовый расход воздуха – расход топлива».

Особенность расчета параметров настройки регулятора мощности ГТУ связана с динамическими свойствами канала «массовый расход воздуха – электрическая мощность ГТУ». Переходная характеристика (рис. 8) имеет немонотонный характер, характеризующий работу многосвязной АСР воздуха и топлива ГТУ, и объясняет появление «петель» на КЧХ (рис. 9). Для расчета АСР в работе использован метод максимума амплитудно-частотной характеристики (МАЧХ) и методика В.А. Биленко, С.А. Таламанова, М.Ю. Тверского, которая позволяет исключить зоны локальной неустойчивости в области параметров настройки регулятора мощности ГТУ, что на практике имеет существенное значение.

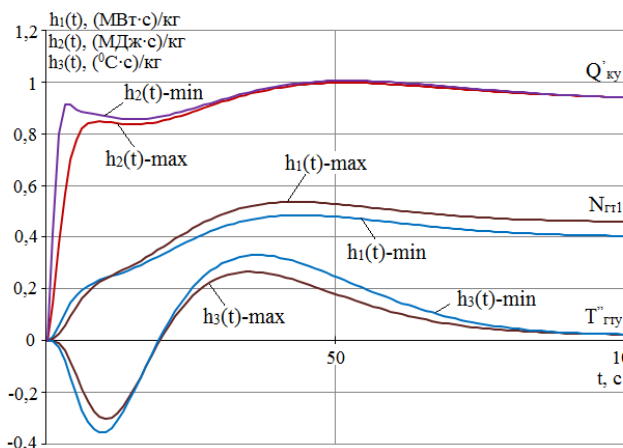


Рис. 8. Переходные характеристики по каналам эквивалентного объекта

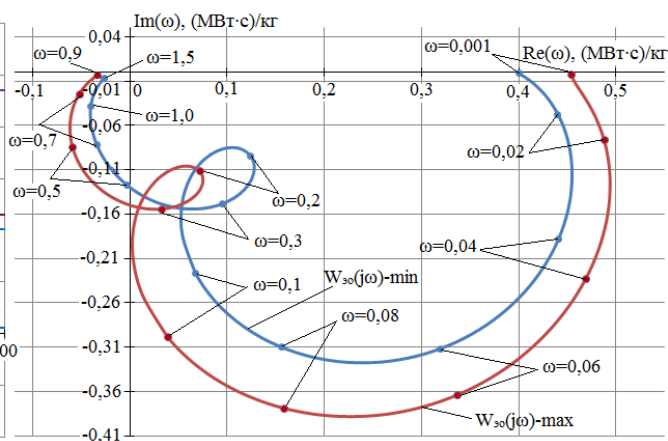


Рис. 9. Вид КЧХ по каналу «массовый расход воздуха – мощность ГТУ»

Обозначено (рис. 8 и 9): $h_1(t)$ – переходная характеристика по каналу «массовый расход воздуха – мощность ГТУ»; $h_2(t)$ – переходная характеристика по каналу «массовый расход воздуха – тепловой поток за ГТУ»; $h_3(t)$ – переходная характеристика по каналу «массовый расход воздуха – температура за ГТУ»; min – минимальная нагрузка; max – максимальная нагрузка.

Оценка эффективности новых технических решений выполнена путем сравнения результатов полученных на модели с эксплуатационными трендами ГТ в режиме полублока из архива АСУТП ПГУ-325. Температура наружного воздуха $+26,6^{\circ}\text{C}$. Блочный регулятор мощности отключен (рис. 10).

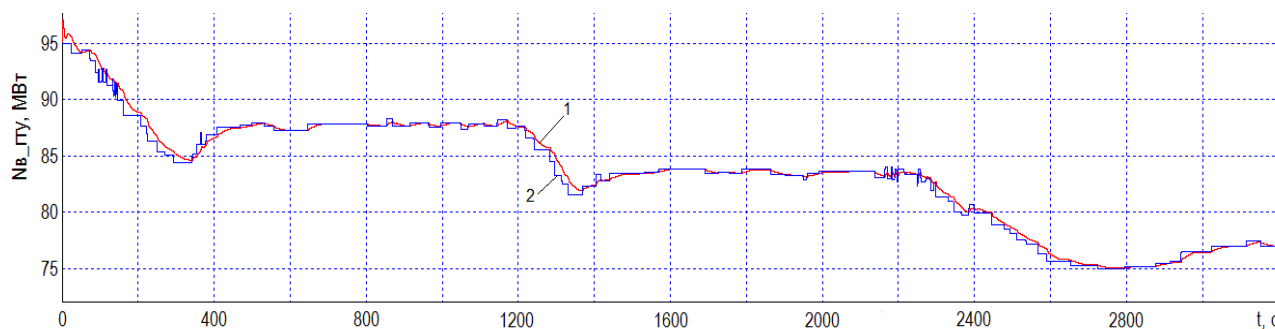


Рис. 10. Входной параметр модели ($N_{зд}$)

Сравнение результатов исследований, которые были получены на модели (рис.11 графики под номером 1) с трендами эксплуатации (рис.11 графики под номером 2) показывают:

- температура и расход перегретого пара ВД модельные выше эксплуатационных; объясняется это тем, что уходящие газы на выходе ГТ поступают к КУ с более высокими параметрами, при этом несовпадение уровней, связано, по-видимому, с низким качеством работы АСР питания в условиях эксплуатации. Это позволяет повысить электрическую мощность ПТ в среднем на 5 МВт (с одного котла-утилизатора);
- расход топлива модельный на 1000 $\text{м}^3/\text{ч}$ выше эксплуатационного; объясняется требованием инструкций к поддержанию температуры дымовых газов за турбиной (перед КУ) на расчетном уровне (верхняя граница эксплуатационного тренда);
- КПД ГТУ выше в среднем на 0,5% (верхняя граница эксплуатационного тренда).

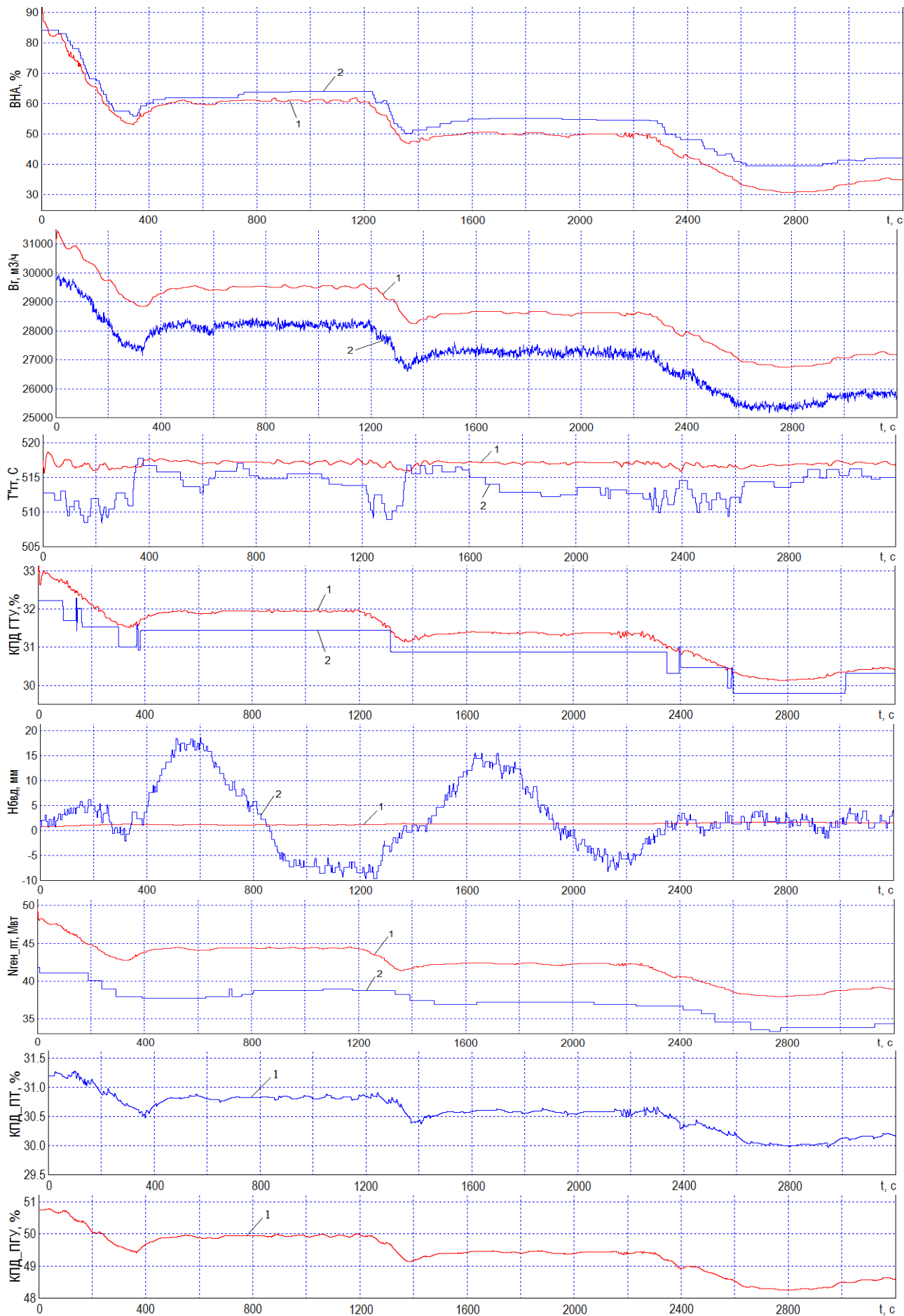


Рис. 11. Работа АСР мощности ГТУ энергоблока ПГУ-325:
1 – модель; 2 – реальная эксплуатация

Следует при этом обратить внимание, что стабилизация массового расхода воздуха (в условиях нерасчетной температуры воздуха на всасе компрессора) возвращает практически все параметры в расчетные диапазоны эффективного управления. В частности, температура уходящих газов за ГТ (см. рис. 5-а, график под номером 2) при этом устанавливается на значении в 540°C , что на 10°C выше рабочего (расчетного) диапазона от 455 до 530°C , определенного надежностью работы ГТУ согласно инструкциям по эксплуатации; температура перегретого пара контура высокого давления (см. рис. 5-б, график под номером 2) остается на расчетном уровне 510°C , а потери электрической мощности и КПД ГТУ снижаются в 2 раза, КПД КУ остается на уровне расчетного – 85%, КПД ПТ – 32,5%, а КПД ПГУ в целом на уровне 51-52%.

Таким образом, разработанная АСР мощности ГТУ энергоблока ПГУ эффективно поддерживает электрическую нагрузку на ГТУ в соответствии с заданием, при этом обеспечивая необходимое соотношение между расходами воздуха и топлива в условиях изменяющихся режимных и внешних климатических факторов.

Заключение

1. Впервые полученные результаты обобщенного термодинамического анализа дают строгое теоретическое обоснование вектора управляемых координат сложного технологического объекта управления, работающего в системообразующей структуре АСУТП энергоблока.

Показано, что для нормальной работы ГТУ, которая реагирует на изменение температуры наружного воздуха, требуется стабилизация массового расхода воздуха, подаваемого в компрессор.

При этом для повышения эффективности работы энергоблока ПГУ в целом необходимо, чтобы тепловой поток отработавших в ГТ дымовых газов на входе в КУ поддерживался на постоянном, предпочтительно максимальном, уровне.

2. Разработана математическая модель ПГУ энергоблока, представленная в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния, реализована в виде открытого полимодельного комплекса.

Математическая модель включает, в том числе, расчет комплексированных параметров – тепловых потоков дымовых газов и массового расхода воздуха, поступающего в компрессор ГТУ, а также оперативный расчет ТЭП энергоблока.

Математическая модель доведена до уровня полимодельного комплекса в виде интегрированной имитационной модели технологического оборудования с выделенной инвариантной частью.

Разработана методика оценки адекватности полимодельного комплекса с использованием реальных трендов из архива АСУТП в широком диапазоне нагрузок энергоблока и изменяющихся внешних климатических факторов.

3. Результаты исследований показали, что критическими факторами влияния изменений температуры наружного воздуха на параметры ПГУ являются неконтролируемое изменение массового расхода общего воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, и изменение температуры воздуха перед камерой сгорания.

В результате автоматической стабилизации массового расхода воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, технологические параметры блока, в том числе КПД оборудования, при

изменяющейся температуре наружного воздуха поддерживаются в расчетных диапазонах эффективного управления.

4. Разработан способ управления мощностью ГТУ энергоблока ПГУ при обеспечении его расчетной эффективности путем стабилизации массового расхода воздуха и коррекции теплового потока за ГТУ.

Автоматическая коррекция теплового потока уходящих газов за ГТ обеспечивает оптимизацию уровня теплового потока перед котлом-утилизатором и соответственно оптимизирует режим работы утилизационной части (КУ и ПТ) энергоблока в широком диапазоне изменения нагрузки.

5. Разработаны автоматические системы регулирования массового расхода воздуха в компрессор ГТУ и мощности ГТУ энергоблока (подачи воздуха в компрессор и топлива в камеру сгорания ГТ) и методика настройки многосвязной системы регулирования.

Показано, что АСР позволяет устранить возникающий при естественных колебаниях температуры наружного воздуха дисбаланс между необходимым расходом топлива и «плавающим» массовым расходом воздуха в широком диапазоне рабочих нагрузок ГТУ энергоблока.

Таким образом, новое структурное решение системы управления ГТУ обеспечивает оптимизацию эффективности ПГУ энергоблоков с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК

1. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Совершенствование системы регулирования расхода воздуха в компрессор газотурбинных установок блоков ПГУ с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов // Автоматизация в промышленности. – 2016. – №8. – С.61-64.
2. **Муравьев И.К.**, Тверской Ю.С. Исследование на математической модели эффективности совместной работы газовой и паровой турбин энергоблока с ПГУ // Автоматизация в промышленности. – 2016. – №1. – С.53-57.
3. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Об одном способе обеспечения расчетной эффективности энергоблоков ПГУ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – Вып.1. – С. 30-36.
4. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Математическая модель энергоблока ПГУ-325 и ее исследование для расчета КПД установки // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2011. – Вып.5. – С. 12-18.

Патенты на изобретения и полезные модели

5. Устройство регулирования расхода воздуха в компрессор газотурбинных установок бинарных энергоблоков // Патент на полезную модель РФ №156580 МПК F01K 13/02 (Заявка №2015105485/06 от 17.02.2015) / Ю.С. Тверской, **И.К. Муравьев** // Оpubл. 10.11.2015. Бюл. №31.

Основные публикации в других изданиях

6. Гоголев С.А., Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Разработка концепции программного комплекса для построения и исследования многовариантных моделей сложных технологических объектов // В кн. «Теория и технология систем управления. Многофункциональные

- АСУТП тепловых электростанций»: В 3-х кн. / Под ред. д.т.н., проф., Ю.С. Тверского. – Иваново, 2013. – Книга 2. – С. 81-87.
7. **Муравьев И.К.**, Тверской Ю.С., Яблоков А.А. Обобщенный термодинамический анализ эффективности теплообменного оборудования паровых котлов // В кн. «Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций»: В 3-х кн. / Под ред. д.т.н., проф., Ю.С. Тверского. – Иваново, 2013. – Книга 2. – С. 114-120.
 8. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Математическая модель энергоблока ПГУ-325 и ее использование для расчета КПД установки // В кн. «Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций»: В 3-х кн. / Под ред. д.т.н., проф., Ю.С. Тверского. – Иваново, 2013. – Книга 2. – С. 139-156.
 9. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Создание математической модели и расчет характеристик энергоблока ПГУ // Сб. трудов IV межд. науч. конф. «Моделирование – 2012» / Институт проблем моделирования в энергетике им. Г.Е. Пухова НАН Украины. – Киев, 2012. – С. 297-303.
 10. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Исследование математической модели энергоблока ПГУ-325 // Сб. докл. специализированной науч.-практ. конф. молодых специалистов «Современные технологии в энергетике – основа повышения надежности, эффективности и безопасности оборудования ТЭС» / ОАО «ВТИ». – Москва, 2012. – С. 318-328.
 11. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Обобщенный термодинамический анализ энергоблоков ПГУ // Материалы отчетной конф. молодых ученых ИГЭУ «Энергия инновации-2012». – Иваново, 2013. – Том 2. – С. 38-55.
 12. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** К вопросу об оптимизации режима работы энергоблока ПГУ на основе его математической модели // Тез. докл. IXX межд. научн.-техн. конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика»; в 4-х т. – М.: МЭИ, 2013. – Т. 4. – С. 167.
 13. **Муравьев И.К.**, Ахмедьянов А.Ф. Модернизация системы стабилизации уровня в барабане котла-утилизатора энергоблока ПГУ // Тез. докл. VIII межд. научн.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Энергия-2013». – Иваново, 2013. – Том 5. – Часть 1. – С. 49-53.
 14. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Анализ проблем и особенностей реализации эталонных математических моделей в среде ПТК АСУТП // Тез. докл. межд. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново, 2013. – Том 2. – С. 268-271.
 15. **Муравьев И.К.** Технология интеллектуализации АСУТП и повышение всережимной эффективности энергоблоков ПГУ / Оптимизация и повышение эффективности работы ТЭС путём внедрения АСУТП: сб. докл. // Третья Междунар. научно-техн. конференция. – М.: ОАО «ВТИ», 2014. – С. 66-72.
 16. **Муравьев И.К.**, Ревин И.В. Разработка динамической модели конденсационной установки энергоблока ПГУ-325 / Математическое моделирование и информационные технологии // Тез. докладов: «Энергия-2015», Иваново, 2015. – Том 5. – Часть 1. – С. 49-53.
 17. **Муравьев И.К.** Этапы поиска и результаты исследования факторов влияния параметров внешней среды на эффективность энергоблоков ПГУ // Тез. докладов: «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»), Иваново, 2015. – Том 2. – С. 270-273.
 18. Тверской Ю.С., **Муравьев И.К.** Технология разработки и оценка адекватности имитационной модели энергоблока ПГУ при изменении режимных и внешних факторов / Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2015): сб. трудов // Седьмая Всероссийская научно-практ. конференция. – М.: ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова», 2015. – Том 2. – С. 357-360.
 19. **Муравьев И.К.** Совершенствование систем управления газотурбинных установок для обеспечения эффективности ПГУ с учетом изменяющихся режимных и климатических

- факторов / Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-29): сб. трудов // XXIX Междунар. научн. конференция. – СПб.: СГТУ, 2016. – Том 5. – С. 99-100.
20. Развитие технологических основ и способа оптимизации эффективности парогазовых технологий / Ю.С. Тверской, **И.К. Муравьев**, А.Н. Никоноров, Ю.В. Наумов и др. // Промежуточный отчет по НИР № гос. рег. 115042370067. Ответственный исполнитель. – Иваново, 2015. – 127 с.

Муравьев Игорь Константинович
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ГАЗОТУРБИННЫМИ УСТАНОВКАМИ ЭНЕРГОБЛОКОВ
ПРИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ РЕЖИМНЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРАХ
Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 05.10.2016 г. Формат 60х84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 118.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34.
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.