

УДК 681.5.017

## Технология и методология разработки полимодельных комплексов для АСУТП энергоблоков с парогазовыми установками

И.К. Муравьев, Е.Д. Маршалов, А.Н. Никоноров, Д.В. Лаврентичев, Ю.С. Тверской  
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
г. Иваново, Российская Федерация  
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

### Авторское резюме

**Состояние вопроса:** Несмотря на то, что энергоблоки с ПГУ обладают целым рядом преимуществ, для них характерна зависимость от параметров окружающей среды, снижающая экономичность оборудования и его эксплуатационную надежность. Невозможность проведения экспериментов по идентификации этих зависимостей на реальном оборудовании при проектировании многофункциональных АСУТП на базе ПТК обуславливает широкое использование математических моделей. Известные модели обладают рядом существенных недостатков: разрабатываются строго под конкретный технологический объект управления, имеют достаточную степень соответствия результатов моделирования только на одном режиме работы и др. Исследования энергоблоков с ПГУ ведут зарубежные компании: Siemens, GE, Alstom, и отечественные организации: ВТИ, МЭИ, ИГЭУ и др. В связи с этим актуальной является задача разработки общей технологии и комплекса частных методов совместного математического моделирования сложного энергетического оборудования с различными динамическими свойствами.

**Материалы и методы:** Для определения вектора координат управляемого технологического оборудования применяются методы неравновесной термодинамики. Математическая модель котла-утилизатора представлена системой уравнений с сосредоточенными параметрами. Для обоснования структуры модели применяются методы теории автоматического управления.

**Результаты:** Предложена технология проектирования полимодельных комплексов, в которых элементы и функции исследуемого объекта описываются с помощью различных классов моделей. Разработан полимодельный комплекс энергоблока с ПГУ, который обладает единой структурой и отличается формированием инвариантной и варьируемой частей, позволяющих моделировать работу энергоблока при различном составе оборудования. Разработана методика оценки меры адекватности полимодельных комплексов для ПГУ.

**Выводы:** Использование разработанного полимодельного комплекса позволяет в реальном времени рассчитывать показатели технической эффективности тепломеханического оборудования станции, с минимальными затратами времени проводить вычислительные эксперименты, направленные на обеспечение эффективности работы ГТУ и блоков ПГУ разной мощности при изменяющихся внешних климатических факторах. Достоверность результатов исследований подтверждается согласованностью результатов вычислительных экспериментов с данными промышленной эксплуатации.

**Ключевые слова:** энергоблок, парогазовые технологии, математическая и имитационная модели, полимодельный комплекс, оценка меры адекватности.

## Technology and methodology of designing multimodel complexes for APCS of power units with combined-cycle gas turbines

I.K. Muravyov, E.D. Marshalov, A.N. Nikonorov, D.V. Lavrentichev, Yu.S. Tverskoy  
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation  
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

### Abstract

**Background:** Despite the fact that power units with CCGT have a number of well-known advantages, they are dependent on environment parameters, which reduces the equipment efficiency and operational reliability. The inability to carry out experiments to identify these dependences on real equipment in the design of multifunctional process control systems based on a hardware and software complex results in extensive use of mathematical models. The known models have a number of significant drawbacks: they are developed strictly for a specific technological control object, have a sufficient degree of conformity of modeling results only in one mode of operation, etc. Intensive studies of power units with CCGT are currently being conducted by a number of foreign companies: Siemens, GE, Alstom, etc. and Russian organizations: VTI, MPEI, ISPU, etc. In this paper, we consider the problem of developing a common technology and a complex of private methods for joint mathematical modeling of complex energy equipment with different dynamic properties.

**Materials and Methods:** Methods of nonequilibrium thermodynamics are used to determine the coordinate vector of controlled process equipment. The mathematical model of the heat recovery boiler is represented by a system of equations with lumped parameters. To justify the structure of the model, we applied the methods of automatic control theory.

**Results:** A technology has been proposed for designing multimodel complexes (MMC) in which the elements and functions of the object under investigation are described by different classes of models. We have developed an MMC of the power unit with CCGT which has a single structure consisting of the invariant and variable parts that allow modeling the operation of such power units with different sets of equipment. A methodology has been worked out for estimating the adequacy of multimodel complexes for CCGT.

**Conclusions:** The use of the developed multimodel complex allows real-time calculation of the technical efficiency indicators of the thermal mechanical equipment of the station, with the minimum time spent on computational experiments aimed at ensuring the efficiency of the gas turbine engine and CCGT units of different capacities under varying external climatic factors. The reliability of the research results is confirmed by the consistency of the results of the computational experiments with the industrial operation data.

**Key words:** power unit, combined-cycle technologies, mathematical and simulation models, multimodel complex, adequacy assessment.

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2018.3.020-028

**Введение.** Современная технология проектирования многофункциональных АСУТП на базе ПТК предусматривает широкое использование математических моделей взаимосвязанного технологического оборудования энергоблоков тепловых и атомных электростанций [1–5].

Разработка высокоточных математических моделей сложного тепломеханического оборудования электростанций создает возможность уже на ранних стадиях функционального проектирования рассмотреть особенности проектируемых технических решений, осуществить своевременную подготовку эксплуатационного персонала и др. Эффективность применения математического моделирования для корректного решения задач управления сложными объектами подтверждена многочисленными исследованиями и уже давно не оспаривается в научных и производственных кругах.

Трудности решения задачи разработки высокоточных математических моделей сложного тепломеханического оборудования связаны, прежде всего, с обоснованием структуры модели и требуемой глубиной моделирования.

**Методы и модели исследования.** В результате сравнительного анализа математических моделей ряда энергоблоков АЭС и ТЭС с ПГУ (ПГУ-325, ПГУ-450, ПГУ-420 и др.) были выявлены некоторые общие особенности [1, 2, 4, 5].

Во-первых, модель, как правило, разрабатывается строго под конкретный технологический объект управления (ТОУ) и адаптация такой модели к другому ТОУ либо вовсе невозможна, либо весьма трудоемка [1, 2].

В последнее время стали широко использоваться разного рода коммерческие программные продукты со скрытыми (недокументированными) особенностями вложенных методов, что зачастую приводит к ошибочным результатам.

Во-вторых, некоторые модели, имея достаточную степень соответствия результатов моделирования на одном режиме работы (преимущественно номинальный – расчетный), в других режимах не отвечают заданным требованиям. Это, как правило, связано с тем, что математическая модель строится на основе регрессионных зависимостей, аппроксимации результатов, полученных из опыта эксплуатации.

Решение задачи построения математической модели возможно на основе законов сохранения неравновесной термодинамики и использования в качестве исходных данных для формирования уравнений состояния и моделирования только конструктивных и режимных особенностей технологического оборудования [1, 2, 6, 7].

В-третьих, практически во всех известных разработках отсутствуют адекватные модели реальной регулирующей арматуры, учитывающие, в том числе, разного рода нелинейности регулирующих органов (РО) и электроприводов.

Современные АСУТП предъявляют высокие требования к качеству регулирующей арматуры, которая является неотъемлемой частью технологического оборудования и функциональным элементом системы управления. Без надежного функционирования регулирующей и запорной арматуры (клапанов, задвижек и пр.) невозможно обеспечить гарантированную технологическую работоспособность локальных систем управления и АСУТП энергоблока в целом [1, 8].

Сложность моделирования РО заключается в том, что при эксплуатации оборудования имеет место износ арматуры, что ведет к нестабильности расходных характеристик, появляются люфты, дребезг, пропуск рабочей среды и пр.

Структура математической модели определяется как тепловой схемой блока, так и комплексом ключевых технологических параметров объекта, многие из которых (например, газотурбинной установки, первого контура ВВЭР) недоступны для непосредственного контроля (имеют опытно-коммерческое происхождение). Это требует постановки и решения новой задачи – строгого теоретического обоснования полноты вектора координат сложного переопределенного ТОУ [1, 5].

Таким образом, задача моделирования работы оборудования электростанций в широком диапазоне изменения нагрузки при разного рода ограничениях, внутренних и внешних возмущениях до сих пор остается открытой [2, 5–7, 9–11].

Решение поставленной задачи направлено на развитие и совершенствование современной технологии и методологии сквозного проектирования АСУТП энергоблоков.

Рассмотрим задачу разработки общей технологии и комплекса частных методов совместного математического моделирования сложного энергетического оборудования с различными динамическими свойствами (на примере мощного энергоблока с парогазовой установкой (ПГУ), работающего в широком диапазоне нагрузок при изменяющихся климатических условиях).

Особенности ПГУ как объекта моделирования. В последние годы в мировой энергетике введено в эксплуатацию большое количество парогазовых энергоблоков. Несмотря на то, что энергоблоки с ПГУ обладают целым рядом известных преимуществ, для них характерен ряд существенных отрицательных факторов, которые влияют как на снижение экономичности оборудования, так и на его эксплуатационную надежность (срок службы ГТ более чем в 2 раза меньше срока службы ПТ) [3–7, 12, 10].

В состав энергоблока ПГУ входит следующее основное оборудование (рис. 1):

– газотурбинная установка (ГТУ) с генератором (количество определяется тепловой схемой);

– котел-утилизатор (КУ) (количество также определяется тепловой схемой);

– паровая турбина (ПТ) с генератором и конденсационной установкой.

Выделим некоторые особенности ПГУ как объекта управления, содержащего активную часть с газотурбинной установкой (ГТУ) и пассивную утилизирующую часть, состоящую из котла-утилизатора (КУ) и паровой турбины (ПТ).

Во-первых, это существенно отличающиеся динамические свойства ГТУ, КУ и ПТ. Во-вторых, диапазон регулирования электрической нагрузки ГТУ и ПГУ является величиной, зависящей от климатических факторов (например, температуры наружного воздуха [5]) и режима работы энергоблока (особенно на пониженных нагрузках). В-третьих, значитель-

ный информационный масштаб системы, состоящий нескольких тысяч точек контроля, при этом в полной мере, как правило, эффективно не используется.

Выделенные особенности необходимо учитывать при разработке математических и имитационных моделей для полноценного использования в составе многофункциональных АСУТП.

При разработке всережимных математических моделей необходимы точные данные о ходе протекания процессов в энергоблоке и его технологических элементах (компрессор, камера сгорания и др.). Однако в реальных условиях некоторые параметры недоступны для непосредственного контроля и определяются косвенным путем, что приводит к недостаточности исходных данных для моделируемых процессов и, как следствие, к ограничению возможностей модели, особенно ее устойчивой работы в переменных режимах. Все это приводит к упрощению процессов, моделируемых в ГТУ, и снижает практическую ценность получаемых результатов.

Другая особенность моделирования заключается в необходимости обоснованного выбора приемлемой степени сложности модели для реализации ее в информационно-технологической среде АСУТП, в системообразующей структуре которой функционирует оборудование.

Результаты проведенных исследований показали, что при моделировании технологических процессов в теплообменниках котла-утилизатора сложность разработки математической модели будет определяться заданной точностью и, соответственно, необходимым количеством разбиений поверхностей нагрева КУ на элементарные объемы, при этом, как правило, возникает проблема обеспечения устойчивости работы системы жестких дифференциальных уравнений.

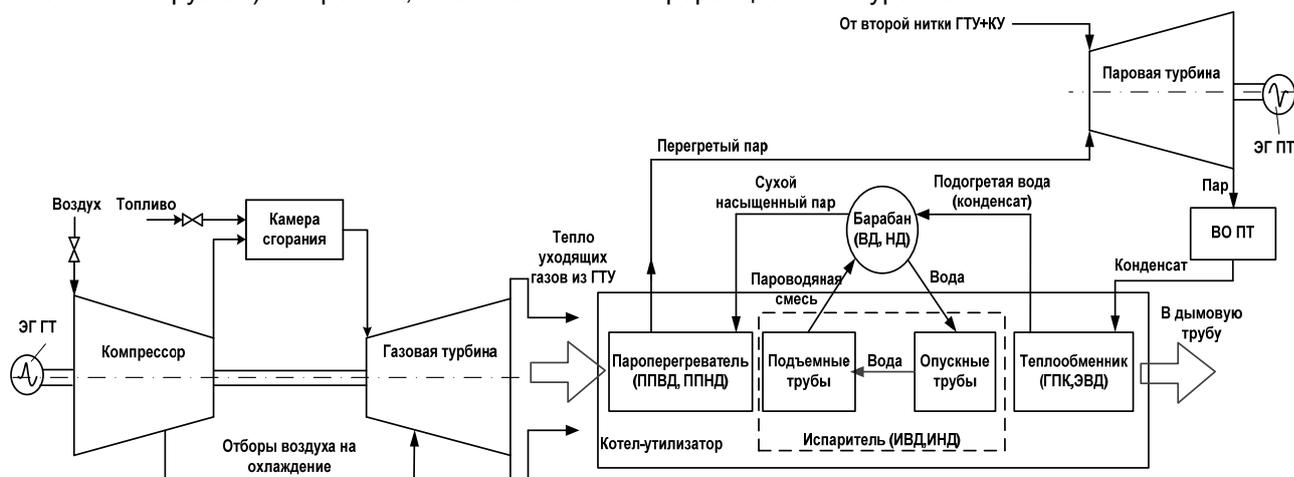


Рис. 1. Принципиальная схема энергоблока ПГУ: ГТУ – газотурбинная установка; КУ – котел-утилизатор; ПТ – паровая турбина; ЭГ ГТ – электрогенератор газовой турбины; ВД и НД – высокое и низкое давление соответственно; ВО – вспомогательное оборудование; ИВД – испаритель высокого давления; ИНД – испаритель низкого давления; ППВД и ППНД – пароперегреватели высокого и низкого давления соответственно; ЭВД – экономайзер высокого давления; ГПК – газовый подогреватель конденсата

В дальнейшем математическая модель КУ и энергоблока с ПГУ интегрируется в среду реального времени ПТК АСУТП, поэтому число разбиений поверхностей нагрева определяется исходя из минимально необходимых требований для корректного моделирования термодинамических процессов в котле-утилизаторе с использованием имеющихся инструментальных средств.

Требования к математическим и имитационным моделям с учетом функционирования в составе многофункциональных АСУТП энергоблоков. Сформулируем некоторые основные требования, предъявляемые к математическим моделям, реализуемым универсальными и специальными инструментальными средствами имитационного моделирования в составе ПТК в целях обеспечения возможности использования их в составе многофункциональных АСУТП [1, 5]:

1) построение математической модели в своей основе должно базироваться на фундаментальных законах сохранения неравновесной термодинамики и соответствующих уравнениях состояния, при этом все коэффициенты системы уравнений должны определяться конструктивными и режимными данными моделируемого оборудования;

2) структура математической модели должна быть открытой, т.е. технология ее построения должна предусматривать возможность простых переходов от упрощенных структур к более полным;

3) модель должна быть модульной и структурированной путем выделения инвариантной и варьируемой частей, что расширяет возможности ее использования для создания моделей разных блоков ПГУ и при различном составе оборудования;

4) модуль регулирующей и запорной арматуры должен предусматривать учет влияния эксплуатационного износа;

5) модель должна быть верифицирована и иметь оценку меры адекватности во временной и в частотной областях в заданном диапазоне нагрузок и изменяющихся внешних климатических факторах.

**Результаты исследования.** Пример реализации требований в структуре имитационной модели (полимодельного комплекса) энергоблока ПГУ приведен на рис. 2 [5]. Полимодельный комплекс отличается тем, что в его состав могут входить разнородные и комбинированные модели, т.е., как показано выше, исследуемый объект описывается несколькими разного рода моделями, при этом результаты работы каждой из входящих в состав комплекса моделей могут оцениваться своей системой показателей [13].

Интеграция модели выполнена путем сборки согласно расчетной схемы. Модель формируется из разработанных макроблоков технологических объектов с учетом физических законов, модель позволяет оперативно рассчитывать технико-экономические показатели энергоблока и его технологического оборудования.

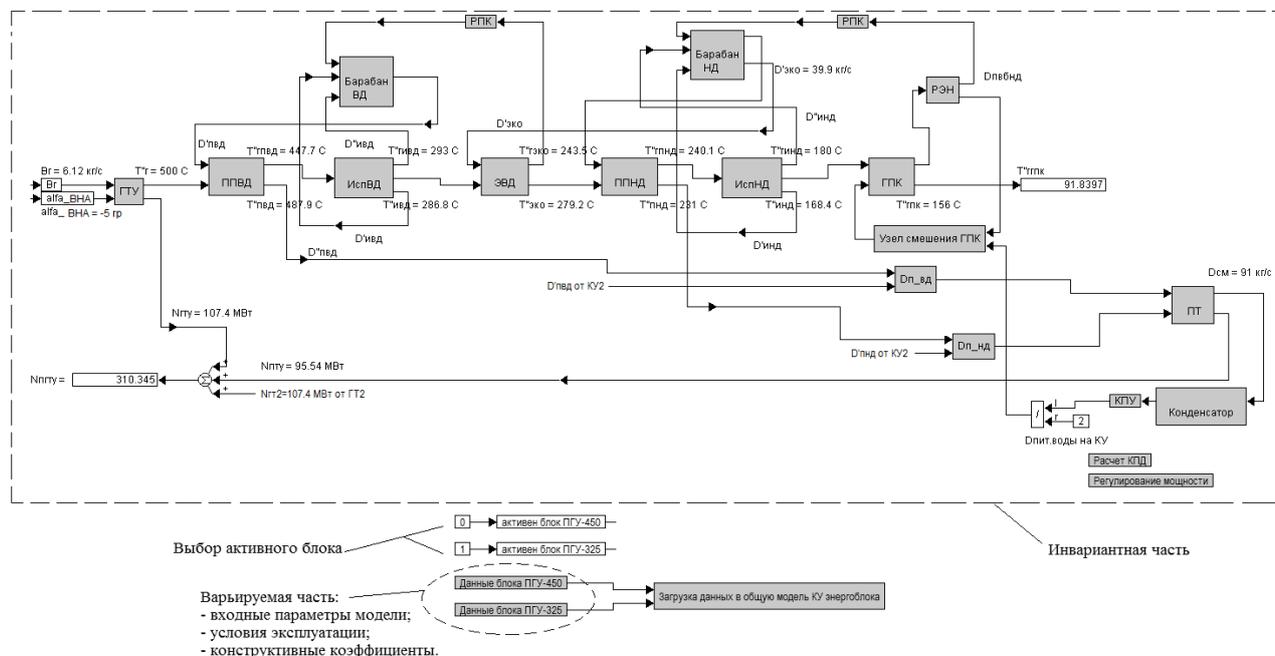


Рис. 2. Обзорная структура имитационной модели (полимодельного комплекса) для энергоблока ПГУ: КПУ – конденсатор ПТ; РПК – регулирующий питательный клапан; D – расход среды; T – температура среды; N – электрическая мощность; В<sub>г</sub> – расход топлива; alfa\_BNA – положение входного направляющего аппарата компрессора

Заключительной стадией проектирования полимодельного комплекса является процедура верификации и оценки меры его адекватности реальному теплоэнергетическому объекту (на ранних стадиях – создаваемому ОУ) [1, 5].

Качественно «правильное» поведение модели теплоэнергетического объекта управления во всех режимах работы энергоблока говорит об отсутствии в реализации математической модели грубых ошибок в привязке уравнений фундаментальных физических законов к моделируемому ТОО.

Верификация полимодельного комплекса и оценка меры его адекватности выполняется в несколько стадий и этапов (рис. 3).

На первой стадии (этапы-блоки 1–3) решаются физические проблемы структурного синтеза САУ и полноты выходных переменных математической модели.

На второй стадии (этапы-блоки 4–8) решаются физико-технические и вычислительные проблемы построения математической и имитационной моделей.

На третьей стадии (этапы-блоки 9–12) решаются задачи оценки адекватности локальных моделей и ПМК в целом.

Третья стадия является основной и состоит из трех этапов.

Первый этап сводится к определению соответствия результатов моделирования на ПМК и результатов тепло-гидравлического расчета. При этом используются статические данные, полученные по результатам тепло-гидравлических расчетов оборудования при различной нагрузке.

На втором этапе выполняем оценку соответствия результатов моделирования эксплуатационным трендам из архива АСУТП и данным режимной карты при различных условиях внешней среды. При этом уточняются коэффициенты модели, а также, согласно испытаниям, устанавливаются значения входных переменных модели.

Третий этап заключается в нахождении значений абсолютных и относительных максимальных погрешностей результатов моделирования, СКО на заданном интервале времени и пр., что может служить количественной оценкой меры адекватности.

При этом для математической модели, согласно теореме единственности операционного исчисления, необходимо обеспечить совпадение динамических характеристик модели и объекта в частотной области.

В случае если адекватность модели в частотной области не доказана, то разработанная модель не может быть применена для

анализа систем автоматического регулирования в составе АСУТП.

Заключительная стадия (этапы-блоки 14–17) определяется задачами эксплуатации ПМК.

В качестве примера рассмотрим результаты, полученные посредством математической модели, настроенной на режимную карту (рис. 2), и экспериментальные характеристики энергоблока ПГУ-325 МВт при изменении нагрузки и относительно постоянной температуре внешней среды  $+26,6^{\circ}\text{C}$  (рис. 4) [5].

Расход топлива изменялся с 4,94 до 6,12 кг/с согласно заданной скорости изменения нагрузки ГТ в соответствии с инструкцией по эксплуатации ГТУ.

В соответствии с протоколом эксплуатации энергоблока ПГУ-325, на вход модели подавали реальные тренды из архива АСУТП. Результаты моделирования сравнивались с выходными трендами ТОО из архива АСУТП.

Анализ полученных результатов исследований показывает:

– электрическая мощность ГТУ (рис. 4,а) совпадает с эксплуатационным трендом достаточно точно;

– реальный тренд изменения температуры дымовых газов за турбиной (рис. 4,б, график 2) является огибающим (ограничивающим) для результата, полученного на модели (рис. 4,б, график 1). Это объясняется требованием инструкций к поддержанию температуры дымовых газов за турбиной на постоянном уровне, что связано с надежностью работы блока в целом;

– характер изменения температуры перегретого пара высокого давления (рис. 4,в) в модели более динамичен, нежели реального тренда из архива АСУТП.

Это можно объяснить, во-первых, тем, что в приведенной модели не учитывается инерционность датчика измерения температуры, а во-вторых, тем, что математическая модель КУ реализована с минимально заданной степенью сложности (использовано минимально необходимое число разбиений поверхностей нагрева на элементарные объемы). Поэтому отклонение модельного значения температуры перегретого пара высокого давления КУ от эксплуатационного не превышает  $5^{\circ}\text{C}$  (рис. 4,в), что не является критическим, поскольку не оказывает существенного влияния на конечный результат моделирования энергоблока ПГУ;

– коэффициент полезного действия ГТУ модельный (рис. 4,г, график 1) практически совпадает с эксплуатационным трендом, что подтверждает высокое качество математической модели (интегрированный показатель).

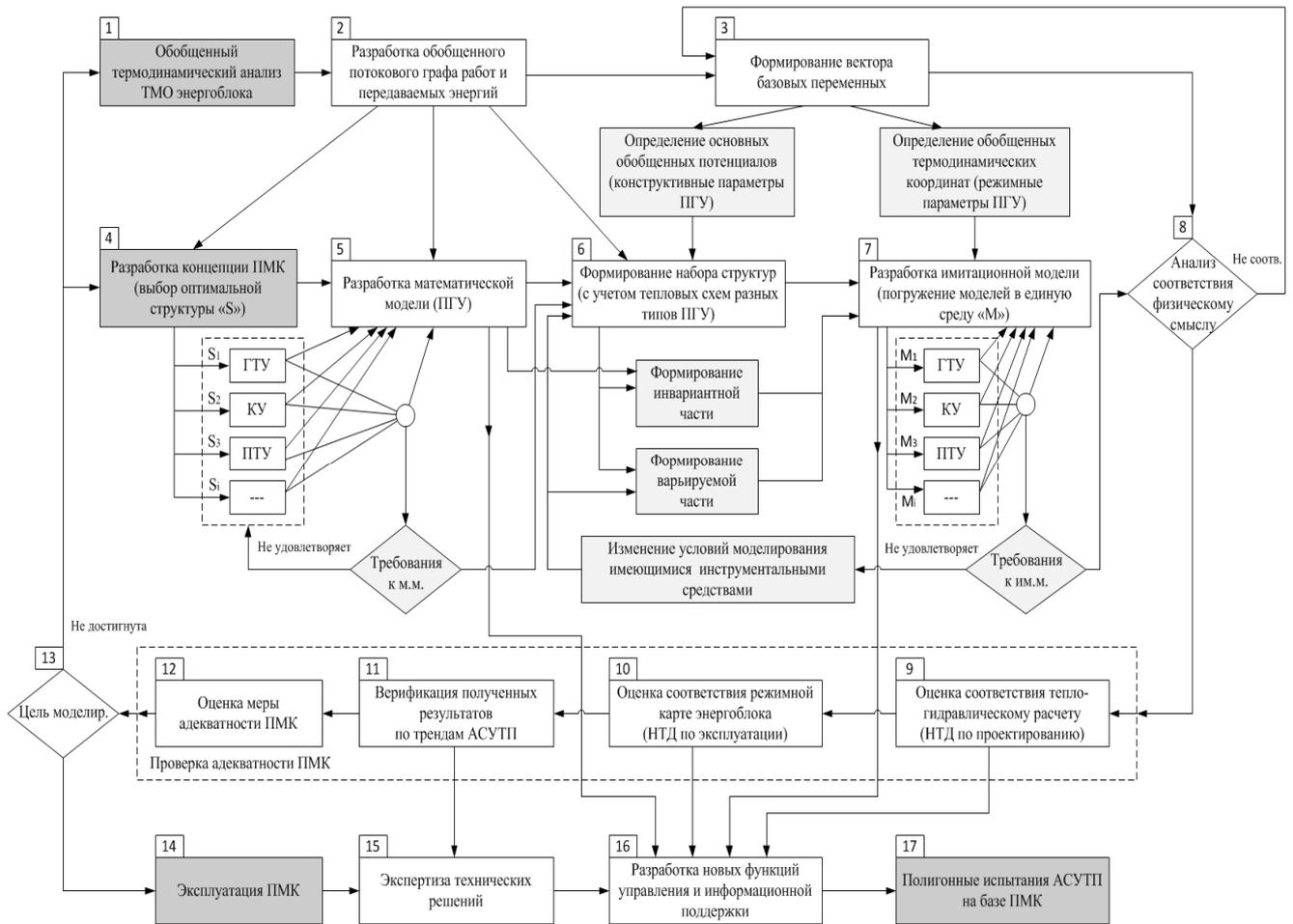


Рис. 3. Схема технологического процесса проектирования полимодельных комплексов для АСУТП энергоблоков (на примере ПГУ)

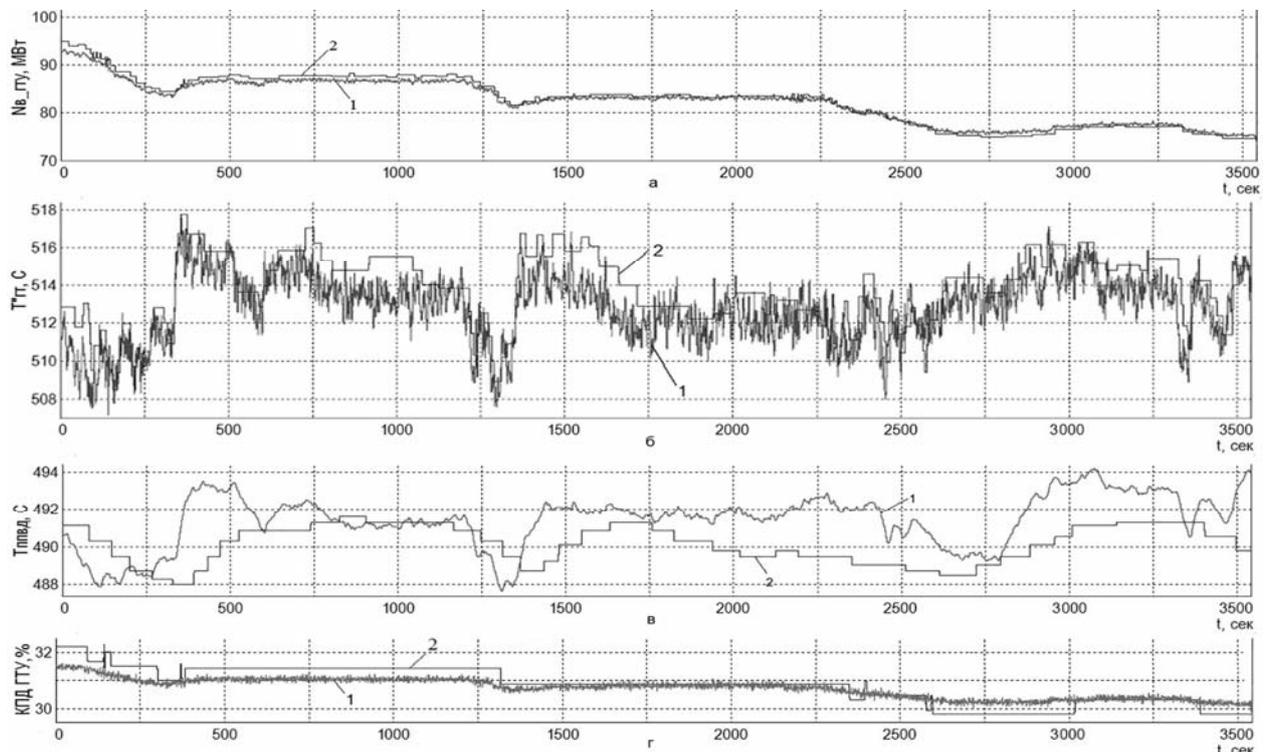


Рис. 4. Исследование результатов модели энергоблока ПГУ: 1 – модель; 2 – реальная эксплуатация; а – электрическая мощность ГТУ; б – температура уходящих (дымовых) газов за ГТ; в – температура перегретого пара пара контура ВД; г – КПД ГТУ

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

Абсолютное максимальное отклонение по мощности ГТУ составило 0,9 МВт, по КПД ГТУ – 0,4 %, по температуре пара контура ВД – 5,5 °С, по расходу пара контура НД – 1,3 т/ч, по мощности ПТ – 4,57 МВт, по мощности блока – 5,47 МВт.

Максимальные относительные погрешности: для мощности ГТУ – 0,91 %, для температуры пара контура ВД – 1,11 %, для расхода пара контура НД – 4,27 %, для мощности ПТ – 9,85 %; по КПД ГТУ, КУ и ПТ – 0,88, 0,92, 5,62 % соответственно; по КПД блока – 1,8 %.

**Выводы.** Анализ специфических проблем создания полимодельных комплексов сложного технологического оборудования позволил сформулировать основные требования, предъявляемые к математическим моделям для их возможного использования в структуре многофункциональных АСУТП.

Впервые показана общая структура технологии проектирования полимодельного комплекса (на примере разработки математической модели энергоблока с ПГУ в рабочем диапазоне нагрузок и изменяющихся внешних климатических факторов).

Использование разработанного полимодельного комплекса позволяет в реальном времени рассчитывать показатели технической эффективности тепломеханического оборудования станции, с минимальными затратами времени проводить вычислительные эксперименты, направленные на обеспечение эффективности работы ГТУ и блоков ПГУ разной мощности при изменяющихся внешних климатических факторах. Достоверность результатов исследований подтверждается согласованностью результатов вычислительных экспериментов с данными промышленной эксплуатации.

Полученные результаты целесообразно использовать для формирования информационного масштаба и структуры математической модели, направленной на решение физических проблем структурного синтеза локальных САУ и АСУТП в целом.

### Список литературы

1. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3 кн. Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование. Кн. 3. Моделирование / под ред. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – Кн. 1. – 260 с. – Кн. 2. – 436 с. – Кн. 3. – 176 с.

2. **Моделирование** процессов в контурах естественной циркуляции котлоутилизаторов ПГУ / Э.К. Аракелян, А.С. Рубашкин, А.С. Обуваев, В.А. Рубашкин // Теплоэнергетика. – 2009. – № 2. – С. 61–63.

3. **Давыдов А.В., Радин Ю.А.** Опыт освоения парогазовых энергоблоков ПГУ-450Т // Электрические станции. – 2009. – № 9. – С. 22–26.

4. **Maojian Wang, Guilian Liu, Chi Wai Hui.** Simultaneous optimization and integration of gas turbine and air separation unit in IGCC plant // Energy. – 2016. – Vol. 116, part. 2. – P. 1294–1301. doi: 10.1016/j.energy.2016.07.053.

5. **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.

6. **Модельные** исследования возможности участия ПГУ в регулировании частоты и перетоков мощности в ЕЭС России / Н.И. Давыдов, Н.В. Зорченко, А.В. Давыдов, Ю.А. Радин // Теплоэнергетика. – 2009. – № 10. – С. 11–17.

7. **Simulation** modelling for new gas turbine fuel controller creation / L.E. Vendland, V.G. Pribylov, Yu.A. Borisov, M.A. Arzamastsev, A.A. Kosoy // РТПЕ-2017. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017), 012260. doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012260.

8. **Маршалов Е.В., Тверской Ю.С.** Особенности моделирования гидравлических систем с регулирующими органами // Теплоэнергетика. – 2014. – Т. 61, № 9. – P. 679–684. doi: 10.1134/S0040601514090122.

9. **Дементьев В.А.** Работы ОАО «ЦНИИКА» по созданию интеллектуальных функций АСУТП объектов энергетики // Теория и практика построения и функционирования АСУТП (CONTROL-2000): тр. Междунар. науч. техн. конф. – М.: МЭИ, 2000. – С. 24–27.

10. **Математическое** моделирование пусковых режимов энергоблока ПГУ-450 Калининградской ТЭЦ-2 / Ю.А. Радин, А.С. Рубашкин, А.В. Давыдов, В.А. Рубашкин // Теплоэнергетика. – 2005. – № 10. – С. 61–64.

11. **Виноградов А.Л., Киселев А.И.** О разработке тренажеров ТЭС на современном этапе // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 2. – С. 13–17.

12. **Елизаров Д.П., Аракелян Э.К.** Маневренные характеристики оборудования тепловых электростанций. – М., 1989. – 129 с.

13. **Соколов Б.В., Юсупов Р.М.** Концептуальные и методические основы квалиметрии моделей и полимодельных комплексов // Тр. СПИИРАН. – 2004. – Вып. 2, Т. 1. – С. 10–35.

## References

1. Tverskoy, Yu.S. *Teoriya i tekhnologiya sistem upravleniya. Mnogofunktsional'nye ASUTP teplovykh elektrostantsiy v 3 kn., kn. 1 (Problemy i zadachi); kn. 2 (Proektirovanie); kn. 3 (Modelirovanie)* [Theory and technology of control systems. Multifunctional APCS of thermal power plants. In 3 books. Book 1 (Problems and tasks). Book 2 (Designing). Book 3 (Modeling)]. Ivanovo, 2013, book 1, 260 p., book 2, 436 p., book 3, 176 p.
2. Arakelyan, E.K., Rubashkin, A.S., Obuvayev, A.S., Rubashkin, V.A. Modelirovanie protsessov v kon-turakh estestvennoy tsirkulyatsii kotlov-utilizatorov PGU [Modeling of processes in the natural circulation circuits of CCGT recovery boilers]. *Teploenergetika*, 2009, no. 2, pp. 61–63.
3. Davydov, A.V., Radin, Yu.A. Opyt osvoeniya parogazovykh energoblokov PGU-450T [Experience in the development of combined-cycle power units CCGT-450T]. *Elektricheskie stantsii*, 2009, no. 9, pp. 22–26.
4. Maojian, Wang, Guilian, Liu, Chi, Wai Hui. Simultaneous optimization and integration of gas turbine and air separation unit in IGCC plant. *Energy*, 2016, vol. 116, part. 2, pp. 1294–1301. doi: 10.1016/j.energy.2016.07.053.
5. Muravyov, I.K., Tverskoy, Yu.S. Issledovanie na matematicheskoy modeli effektivnosti sovmestnoy raboty gazovoy i parovoy turbin energobloka s PGU [Research based on the mathematical model of efficiency of joint operation of gas and steam turbines of the CCGT power unit]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2016, no. 1, pp. 53–57.
6. Davydov, N.I., Zorchenko, N.V., Davydov, A.V., Radin, Yu.A. Model'nye issledovaniya vozmozhnosti uchastiya PGU v regulirovanii chastoty i peretokov moshchnosti v EES Rossii [Model studies of the possibility of CCGT participation in regulating the frequency and power flows in the Unified Power System of Russia]. *Teploenergetika*, 2009, no. 10, pp. 11–17.
7. Vendland, L.E., Pribylov, V.G., Borisov, Yu.A., Arzamastsev, M.A., Kosoy, A.A. Simulation modelling for new gas turbine fuel controller creation. PTPPE-2017. IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 891 (2017), 012260. doi: 10.1088/1742-6596/891/1/012260.
8. Marshalov, E.D., Tverskoy, Yu. S. Oso-bennosti modelirovaniya gidravlicheskih sistem s reguliruyushchimi organami [Specific features of modeling hydraulic systems with control elements]. *Teploenergetika*, 2014, T. 61, no. 9, pp. 679–684. doi: 10.1134/S0040601514090122.
9. Demytyev, V.A. Raboty OAO «TSNIKA» po sozdaniyu intellektual'nykh funktsiy ASUTP ob"ektov energetiki [Works of JSC «CNIKA» on development of smart functions of the automated process control system of power engineering objects]. *Trudy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Teorija i praktika postroeniya i funkcionirovaniya ASUTP (CONTROL-2000)»* [Collected works of the International scientific and technical conference «Theory and practice of building and functioning of automated process control systems»]. Moscow: MEI, 2000, pp. 24–27.
10. Radin, Yu.A., Rubashkin, A.V., Davydov, N.I., Rubashkin, V.A. Matematicheskoe modelirovanie puskovykh rezhimov energobloka PGU-450 Kaliningradskoy TETS-2 [Mathematical modeling of start-up regimes of the PGU-450 power unit at Kaliningradskaya TPP-2]. *Teploenergetika*, 2005, no. 10, pp. 61–64.
11. Vinogradov, A.L., Kiselev, A.I. O razrabotke trenazherov TES na sovremennom etape [On the current development of TPP simulators]. *Vestnik IGEU*, 2014, issue 2, pp. 13–17.
12. Elizarov, D.P., Arakelyan, E.K. *Manevrennye kharakteristiki oborudovaniya teplovykh elektrostantsiy* [Maneuverable characteristics of thermal power plant equipment]. Moscow, 1989. 129 p.
13. Sokolov, B.V., Yusupov, R.M. Kontseptual'nye i metodicheskie osnovy kvalimetrii modeley i polimodel'nykh kompleksov [Concepts and methods of the qualimetry of models and multi-model complexes]. *SPIIRAN*, 2004, issue 2, vol. 1, pp. 10–35.

*Муравьев Игорь Константинович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления,  
телефон (4932) 26-97-57,  
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

*Muravyov Igor Konstantinovich,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Control Systems Department,  
tel. (4932) 26-97-57,  
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

*Маршалов Евгений Дмитриевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления, декан факультета информатики и  
вычислительной техники,  
телефон (4932) 26-97-58,  
e-mail: edm@su.ispu.ru

*Marshalov Yevgeny Dmitrievich,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Dean of the IT and Computer Science Faculty,  
tel. (4932) 26-97-58,  
e-mail: edm@su.ispu.ru

*Никоноров Андрей Николаевич,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры систем управления,  
телефон (4932) 26-97-57,  
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

*Nikonorov Andrei Nikolayevich,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Control Systems Department,  
tel. (4932) 26-97-57,  
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

*Лаврентичев Дмитрий Владимирович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
аспирант кафедры систем управления,  
телефон (4932) 26-97-57,  
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

*Lavrentichev Dmitry Vladimirovich,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Post-graduate Student of the Control Systems Department,  
tel. (4932) 26-97-57,  
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

*Тверской Юрий Семенович,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
доктор технических наук, профессор кафедры систем управления,  
телефон (4932) 26-97-58,  
e-mail: tverskoy@su.ispu.ru

*Tverskoy Yuri Semyonovich,*

Ivanovo State Power Engineering University,  
Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor, Professor of the Control Systems Department,  
tel. (4932) 26-97-58,  
e-mail: tverskoy@su.ispu.ru