



РАЗРАБОТКА УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ АСУТП ЭНЕРГОБЛОКА С ПАРОГАЗОВОЙ УСТАНОВКОЙ

**А.Н. Никоноров, И.К. Муравьев, Е.Д. Маршалов, Т.Е. Муравьева
(ФГБОУВО ИГЭУ им. В.И. Ленина)**

Приводятся результаты разработки учебно-исследовательской АСУТП, в составе которой функционирует математическая модель отечественного энергоблока с парогазовой установкой (ПГУ). Учебно-исследовательская АСУТП реализована на базе учебно-исследовательского комплекса «Полигон АСУТП электростанций», в основу технической структуры которого положена обобщенная структура промышленной АСУТП электростанции на базе программно-технического комплекса (ПТК). Рассматривается методика создания учебно-исследовательской АСУТП, а также основные особенности ее реализации средствами промышленного ПТК. Разработанная учебно-исследовательская АСУТП позволяет выполнять безопасное тестирование и отладку новых алгоритмов управления, осуществлять подготовку специалистов по автоматизации и может применяться для повышения квалификации персонала электростанций.

Ключевые слова: учебно-исследовательская АСУТП, парогазовая установка, программно-технический комплекс, модель объекта, подготовка специалистов.

Введение

Современные многофункциональные АСУТП создаются на основе сквозной технологии разработки, проектирования, изготовления, наладки и ввода в действие АСУТП.

Сквозная технология создания сложных многофункциональных АСУТП включают следующие основные этапы [1, 2]:

- начальная стадия (предконтрактные работы);
- стадия разработки технического задания;
- функциональное проектирование (синтез алгоритмов управления и разработка прикладного программного обеспечения);
- конструкторское проектирование (разработка проекта технической структуры);
- ввод в действие (технологическое проектирование).

Эффективность разрабатываемой АСУТП во многом зависит от решений, принимаемых на этапах функционального проектирования и технологического проектирования (ввод в действие и анализ качества).

Стадия функционального проектирования включает, в том числе разработку алгоритмов реализации таких сложных функций АСУТП, как автоматическое регулирование и функционально-групповое логическое управление. При этом существует проблема экспериментальных исследований применяемых алгоритмов, особенно в случаях, когда алгоритмические решения не являются типовыми.

На стадии технологического проектирования выполняется поставка технических средств автоматиза-

ции, проводятся заводские полигонные испытания ПТК, осуществляется монтаж технических средств АСУТП, выполняются предпусковые и пусконаладочные работы, проводятся испытания, и в результате АСУТП принимается в опытную и промышленную эксплуатацию. При этом задачей заводских полигонных испытаний ПТК является проверка работоспособности программно-аппаратных средств. Проверка функционирования реализуемых алгоритмов контроля и управления на данном этапе не выполняется. Ошибки в алгоритмах АСУТП приходится искать и исправлять уже на действующем оборудовании, что может привести к его повреждению и затягиванию сроков ввода в эксплуатацию.

Кроме того, эффективность работы АСУТП во многом зависит от действий персонала, выполняющего наладку и эксплуатацию системы управления. Поэтому важной задачей является предварительная подготовка и своевременное повышение квалификации эксплуатационного персонала электростанций.

Решение указанных проблем может быть связано с использованием полигонов АСУТП, позволяющих отрабатывать сложные алгоритмы управления ещё на ранних стадиях проектирования технологического оборудования и системы управления, а также проводить обучение и тренировки специалистов по разработке, наладке и эксплуатации автоматизированных систем управления.

За последние годы в тепловой энергетике разработано и внедрено большое число различных тренажеров, по данной теме опубликовано много научных работ

отечественных и зарубежных ученых [3-7]. Однако отметим, что учебно-исследовательские (полигонные) АСУТП позволяют решать более широкий круг задач по сравнению с тренажерными комплексами, при этом они обладают своими отличительными особенностями как с точки зрения технологии разработки, так и практической применимости.

В основу технической структуры полигона АСУТП положена обобщенная структура промышленной АСУТП электростанции на базе ПТК. Техническая и функциональная структура полигона, его математическое и программное обеспечение позволяют создавать полноценно функционирующие в режиме реального времени учебно-исследовательские (полигонные) АСУТП энергоблоков (рис. 1) [8].

Учебно-исследовательская АСУТП отличается от основного (промышленного) прототипа тем, что имеет меньший информационный масштаб (объем моделируемого технологического оборудования и исполнительных устройств) и меньший объем реализуемых функций управления. Выбор полноты охвата системой моделируемого оборудования и функций управления определяется задачами, решаемыми конкретной учебно-исследовательской АСУТП. Выделим три класса задач: практические, научные и учебные.

К практическим задачам относится, например, экспертиза проектных решений, принимаемых при

разработке АСУТП. В этом случае полигон АСУТП является испытательным стендом, позволяющим протестировать технические решения на модели объекта управления информационно совместимой с ПТК управляющей системы.

Решение научных задач предполагает использование полигона АСУТП в качестве экспериментальной установки, позволяющей выполнять научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, направленные на совершенствование сложных наукоемких функций систем управления, диагностирования и др.

При решении учебных задач полигон АСУТП функционирует как тренажерный комплекс. Однако в отличие от стандартных тренажеров энергоблоков, предназначенных для оперативного персонала электростанций, здесь к обучаемым категориям специалистов можно отнести также работников основных подрядных организаций (инжиниринговых, наладочных и проектных организаций).

В целом учебно-исследовательские АСУТП энергоблоков ТЭС позволяют изучать и разрабатывать локальные системы управления технологическими объектами на базе современных программно-технических комплексов сетевой иерархической структуры и качественно улучшать учебный процесс подготовки и переподготовки специалистов энергетических предприятий, а также выполнять научные исследования, направленные на совершенствование алгоритмов автоматического управления технологическим оборудованием и повышение качества функционирования АСУТП объектов энергетики.

Методика создания учебно-исследовательской АСУТП

Методика создания учебно-исследовательской АСУТП

Методика разработки учебно-исследовательских АСУТП во многом повторяет технологию создания многофункциональных АСУТП энергоблоков и отличается тем, что в ней присутствует этап, связанный с моделированием технологического объекта управления.

Этап 1. Разработка концепции и требований к учебно-исследовательской АСУТП:

шаг 1.1 – определение цели и задач создания АСУТП;

шаг 1.2 – формирование требований к задачам автоматического управления;

шаг 1.3 – формирование требований к модели объекта управления;

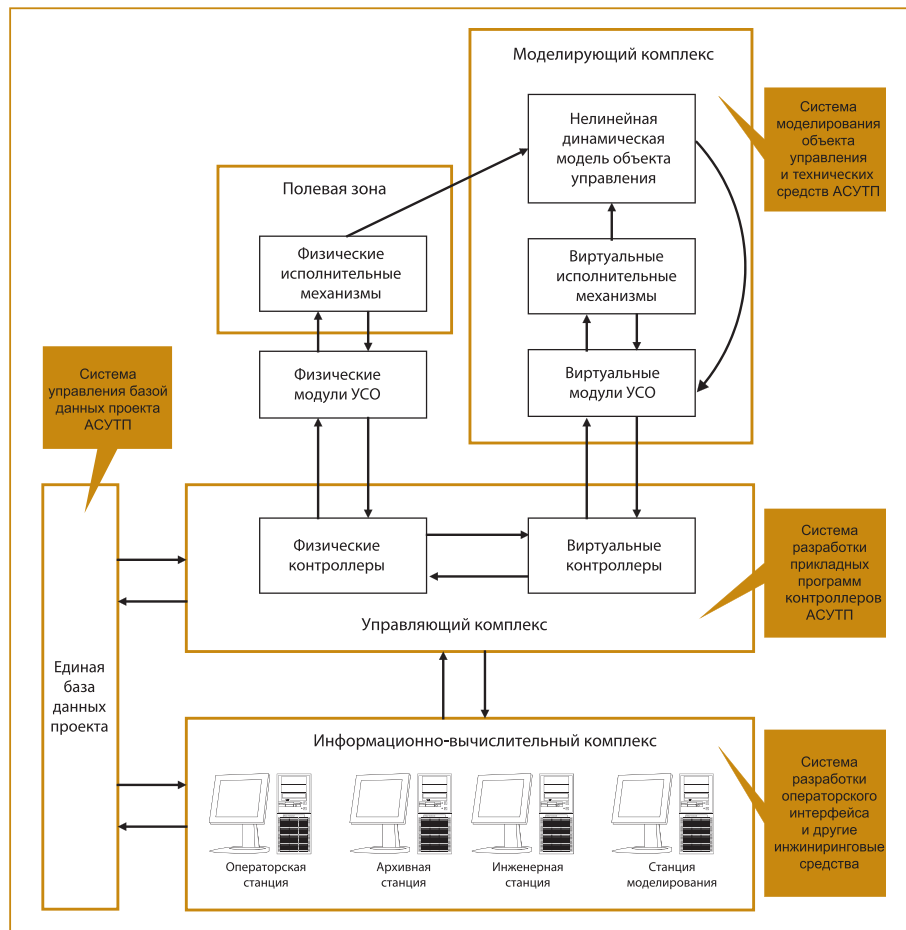


Рис. 1. Типовая структура учебно-исследовательской АСУТП

- шаг 1.4 – выбор базового ПТК;
- шаг 1.5 – выбор средств реализации имитационной модели объекта управления.

На первом этапе в зависимости от цели и задач разрабатываемой учебно-исследовательской АСУТП формируется ее общая структура (техническая, функциональная, информационная).

Ключевым вопросом первого этапа и всей методики построения учебно-исследовательских АСУТП является выбор средств разработки имитационных моделей объектов управления. Во многом этот выбор определяется сформулированными требованиями к имитационной модели. Одним из возможных вариантов является реализация моделей технологических объектов управления (ТОУ) универсальными средствами моделирования (MATLAB, Simulink, VisSim, SimInTech и др.). Этот вариант подразумевает функционирование в контуре АСУТП станции моделирования. Другим вариантом является реализация моделей ТОУ средствами ПТК АСУТП.

Этап 2. Разработка подсистемы модели объекта управления:

- шаг 2.1 – декомпозиция сложного объекта управления на технологические зоны и подсистемы;
- шаг 2.2 – разработка математической модели для каждого компонента объекта управления;
- шаг 2.3 – разработка имитационной модели объекта управления;
- шаг 2.4 – формирование взаимодействия имитационной модели объекта управления с базовым ПТК;
- шаг 2.5 – комплексное тестирование и отладка имитационной модели объекта управления.

Сложный технологический объект управления структурируется и представляется состоящим из отдельных участков (конструктивных или технологических компонентов), которые разбиваются на элементарные объемы (модель с сосредоточенными параметрами). Обосновывается уровень сложности математической модели исходя из задач, выполняемых учебно-исследовательской АСУТП. Для каждого элементарного объема составляются уравнения баланса на основе законов сохранения массы, количества движения, энергии, а также феноменологических уравнений состояния рассматриваемых процессов.

Этап 3. Разработка подсистемы управления:

- шаг 3.1 – синтез алгоритмов решения задач автоматического управления;
- шаг 3.2 – заполнение оперативной базы данных АСУТП;
- шаг 3.3 – разработка алгоритмических схем решения функциональных задач в контроллерах ПТК;
- шаг 3.4 – разработка операторского интерфейса в реальной среде АСУТП.

Выполняемые на данном этапе действия полностью идентичны процедуре разработки прикладного программного обеспечения промышленной АСУТП.

Этап 4. Ввод в действие и проведение испытаний учебно-исследовательской АСУТП:

- шаг 4.1 – запуск модели объекта управления в режиме реального времени;
- шаг 4.2 – загрузка технологических программ в реальные и виртуальные контроллеры;
- шаг 4.3 – тестирование и отладка алгоритмов подсистемы управления;
- шаг 4.4 – комплексные испытания учебно-исследовательской АСУТП.

Выполняемые на заключительном этапе шаги во многом соответствуют работам по вводу в эксплуатацию промышленной АСУТП.

Учебно-исследовательская АСУТП энергоблока ПГУ-325

Этап 1. Разработка концепции и требований к учебно-исследовательской АСУТП.

В качестве объекта исследований выбран отечественный энергоблок с парогазовой установкой электрической мощностью 325 МВт и перспективным газотурбинным двигателем мощностью 110 МВт. Целью разработки является создание учебно-исследовательской АСУТП энергоблока ПГУ-325, которая может использоваться в качестве экспериментальной установки для обучения студентов по направлению «Управление и информатика в технических системах» и для проведения исследований новых технических решений по автоматизации энергоблоков с ПГУ.

Для использования разрабатываемой системы в учебных целях необходимо, чтобы в ней были реализованы, хотя бы в минимальном объеме, все основные функции АСУТП (контроль параметров, сигнализация, блокировки, защиты, автоматическое регулирование, функционально-групповое управление и др.).

Исходя из специфики задач, решаемых учебно-исследовательской АСУТП, сформулируем следующие требования к функционирующей в её составе имитационной модели:

- корректно имитировать все возможные режимы функционирования реального объекта;
- обеспечивать удовлетворительное соответствие статических и динамических характеристик реальному объекту;
- допускать свою модификацию;
- функционировать в реальном масштабе времени;
- быть реализуемой средствами ПТК АСУТП или универсальными средствами имитационного моделирования.

В качестве базового программно-технического комплекса для реализации АСУТП выбран промышленный ПТК отечественного производства.

Для разработки и реализации модели технологического оборудования выбран подход, при котором математическая модель реализуется и тестируется в системе имитационного моделирования SimInTech, а затем переносится в ПТК, где функционирует совместно с системой управления технологическим объектом.

Этап 2. Разработка подсистемы модели объекта управления.

Бинарный энергоблок представляет собой сложный многосвязный технологический объект управления, при моделировании которого целесообразно выделить следующие технологические зоны: газотурбинная установка (ГТУ), котел-утилизатор (КУ), паровая турбина (ПТ).

Математическая модель энергоблока представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений, при этом все коэффициенты систем уравнений определены конструктивными и режимными данными моделируемого оборудования, что позволяет оценить ее работоспособность и адекватность не только в статическом режиме работы, а также обеспечить и соответствие динамики модели относительно реального объекта. Особенности разработки математической модели энергоблока ПГУ-325 приведены в [9, 10].

Имитационная модель энергоблока ПГУ-325, реализованная в системе имитационного моделирования SimInTech, имеет следующие особенности:

1) использован принцип модульного построения, то есть в состав модели ПГУ входят макроблоки (модули) отдельных технологических зон (ГТУ, КУ, ПТ, конденсатор и др.), при этом модель структурирована путем выделения инвариантной (не зависящей от режима работы оборудования) и варьированной частей, что расширяет ее функциональные возможности при интеграции в ПТК АСУТП;

2) при моделировании теплообменников КУ каждая поверхность нагрева разбивается на элементарные участки, минимальное количество которых определяется требуемой точностью моделирования термодинамических процессов, а максимальное число ограничивается вычислительными возможностями компьютера (рис.2);

3) учитывается изменение параметров воздушного потока (температура, давление), поступающего в компрессор ГТУ, которые, как известно, оказывают критическое влияние на эффективность работы оборудования и на выбор оптимального режима работы энергоблока;

4) модели регулирующей и запорной арматуры предусматривают учет влияния эксплуатационного износа.

Экспериментальные исследования имитационной модели в системе SimInTech показали высокую статическую и динамическую точность модели. В статическом режиме проводилось сравнение параметров модели со значениями режимной карты энергоблока. В динамическом режиме сравнивались графики изменения параметров модели и архивные данные из АСУТП энергоблока в виде трендов сигналов при переходе с одной нагрузки блока на другую. Так максимальное отклонение основных технологических параметров, полученных по модели, от реальных не превысило 5%.

Имитационная модель может рассчитываться в ускоренном масштабе времени, что существенно облегчает ее отладку и исследование. Однако для организации взаимодействия модели объекта и системы управления объектом в рамках учебно-исследовательской АСУТП предпочтительно, чтобы они функционировали в единой информационной среде. Поэтому имитационная модель энергоблока ПГУ-325 была перенесена в ПТК путем ее реализации в системе подготовки технологических программ контроллеров. Таким образом, взаимодействие между подсистемой модели и подсистемой управления организовано на уровне информационного обмена между контроллерами управления и виртуальными контроллерами модели.

При интеграции в среду реального времени ПТК АСУТП возникает ряд проблем, среди которых, например, проблема обеспечения функционирования модели в режиме реального времени. Для ее решения было уменьшено число разбиений теплообменников на элементарные объемы, исходя из минимально необходимых требований для корректного моделирования термодинамических процессов в котле-утилизаторе.

Информационный объем учебно-исследовательской АСУТП энергоблока ПГУ-325 характеризуется следующими показателями.

При реализации имитационной модели в ПТК используются:

- в модели ГТУ: 14 макроблоков с общим числом алгоблоков 208 ед.;
- в модели КУ: 127 макроблоков с общим числом алгоблоков 563 ед.;
- в модели ПТ: 10 макроблоков с общим числом алгоблоков 186 ед.

При реализации подсистемы управления в проекте задействовано следующее число виртуальных модулей устройств связи с объектом (моделью объекта):

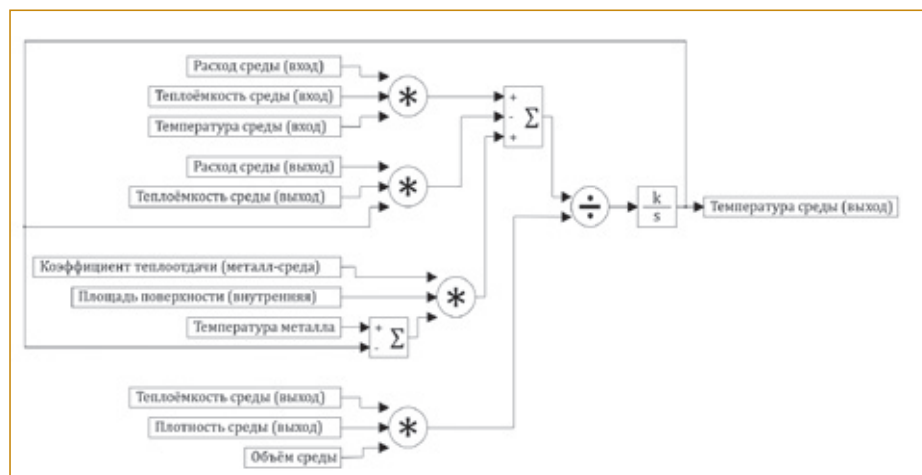


Рис. 2. Макроблок расчёта температуры среды на выходе элементарного участка теплообменника, реализованный в SimInTech

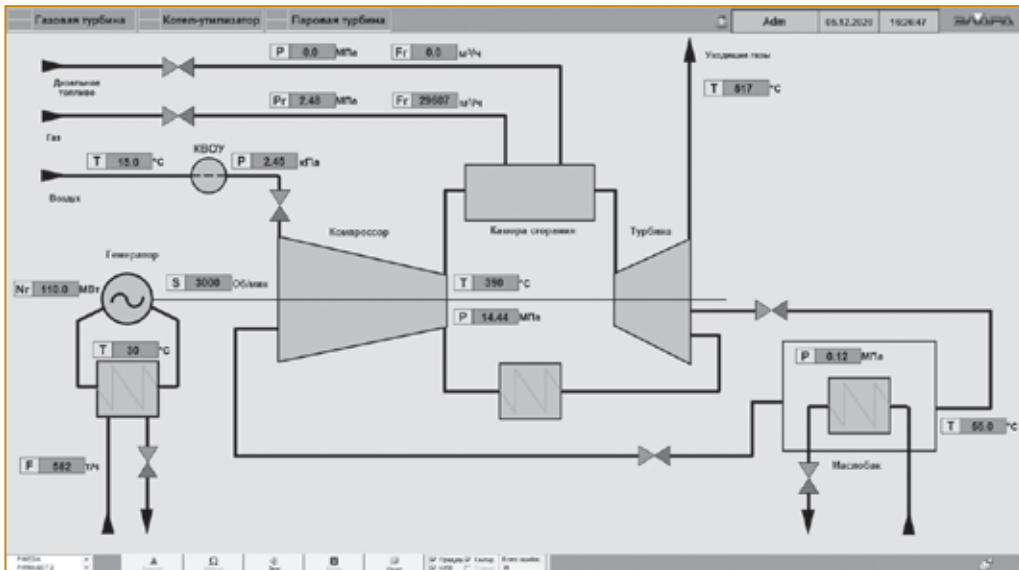


Рис. 3. Фрагмент мнемосхемы «Газотурбинная установка»

- для КУ: аналого-цифровые преобразователи (АЦП) – 5 ед., дискретно-цифровые преобразователи (ДЦП) – 2 ед., цифро-импульсные преобразователи (ЦИП) – 1 ед., цифро-дискретные преобразователи (ЦДП) – 1 ед.;

- для ГТУ: АЦП – 3 ед., ДЦП – 1 ед., ЦИП – 1 ед.;

- для ПТ: АЦП – 3 ед., ДЦП – 1 ед., ЦИП – 1 ед.

Комплексное тестирование имитационной модели энергоблока ПГУ-325, реализованной в ПТК, показало незначительное ухудшение точности относительно модели, реализованной в SimInTech, и удовлетворительное соответствие реальным процессам, достаточное для решаемых учебно-исследовательской АСУТП задач.

турбиной, уровней в барабанах высокого и низкого давлений КУ, уровня в конденсаторе и др.) выполнен параметрический синтез и оптимизация с использованием экспериментальных данных, полученных с имитационной модели объекта управления.

Вся информация по технологическим объектам энергоблока (датчикам, регулирующим клапанам, задвижкам, насосам, аналоговым и импульсным регуляторам и т.д.) занесена в базу данных АСУТП. Работа с базой данных осуществляется с помощью приложения, входящего в состав ПТК.

Алгоритмы решения основных задач управления реализованы в системе технологического программирования контроллеров на языке FBD (Function Block Diagram), представляющем собой совокупность последовательно выполняемых функциональных блоков.

Графический интерфейс учебно-исследовательской АСУТП разработан с помощью системы проектирования мнемосхем, входящей в состав ПТК (рис. 3). За основу были взяты мнемосхемы блока-прототипа – действующего энергоблока ПГУ-325.

Поскольку имитационная модель объекта реализована в той же среде (система технологического программирования контроллеров), что и управляющая система, то отдельной процедуры запуска модели и инициализации ее связи с управляющей системой не требуется.

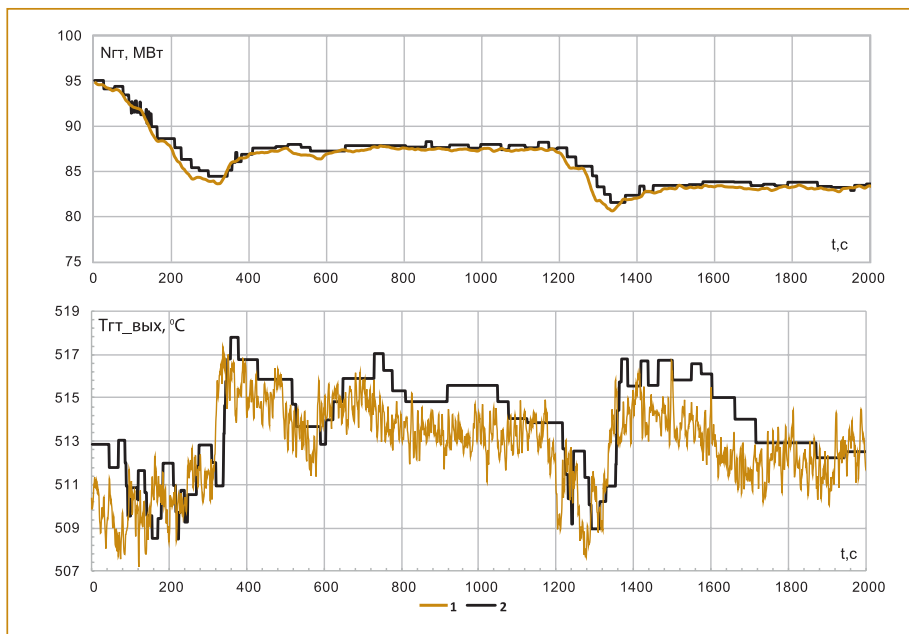


Рис. 4. Фрагмент комплексных испытаний учебно-исследовательской АСУТП энергоблока ПГУ-325, где: 1 – реальная эксплуатация; 2 – модель; $N_{гт}$ – электрическая мощность ГТУ; $T_{гт_вых}$ – температура дымовых газов за ГТ; t – время

Сигналы от модели, имитирующие сигналы датчиков технологических параметров, заводятся на виртуальные контроллеры ПТК. На реальные контроллеры заводятся сигналы от реальных исполнительных механизмов (регулирующий клапан, задвижка, электродвигатели).

В ходе тестирования и отладки алгоритмов подсистемы управления были устранены отдельные ошибки, допущенные на стадии проектирования, уточнены некоторые параметры систем автоматического регулирования.

Комплексные испытания проводились на функционирующей в штатном режиме учебно-исследовательской АСУТП энергоблока ПГУ-325 (рис. 4). В ходе испытаний осуществлялся переход с номинального режима работы блока на пониженную нагрузку и далее останов блока.

Сравнение результатов испытаний с архивными трендами реального энергоблока показало достаточно хорошее совпадение статических и динамических характеристик по основным технологическим параметрам, что позволяет использовать разработанную учебно-исследовательскую АСУТП энергоблока ПГУ-325 в учебных и научно-исследовательских задачах.

Выводы

1. Учебно-исследовательские АСУТП являются новым наукоемким элементом технологии создания multifunctional АСУТП на базе современных ПТК и предназначены для экспертизы технических решений на ранних стадиях проектирования АСУТП, а также обеспечения процесса подготовки и переподготовки специалистов энергетических предприятий.

2. Рассмотрена методика создания учебно-исследовательских АСУТП энергоблоков, отличающаяся наличием этапа разработки подсистемы модели объекта управления. Функционирование данной подсистемы позволяет совершенствовать алгоритмы автоматического управления технологическим оборудованием за счет включения в контур управления эталонной математической модели. Последняя настроена на режим, соответствующий режимной карте энергоблока, и при изменениях режимных и внешних климатических факторов позволяет выводить дополнительную информацию для поддержки принятия решения, а также прогнозировать траекторию протекания процесса по текущим данным режима работы оборудования.

Список литературы

1. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн.1. Проблемы и задачи. Кн.2. Проектирование. Кн.3. Моделирование / Под общей ред. Ю.С. Тверского; ФГБОУВО ИГЭУ им. В.И. Ленина. Иваново. 2013. — Кн.1. 260 с. — Кн.2. 436 с. — Кн.3. 176 с.
2. *Тверской, Ю.С.* Подготовка и повышение квалификации специалистов в области современных АСУТП электростанций / Ю.С. Тверской, Э.К. Аракелян, С.И. Кузнецов // Теплоэнергетика. — 2006. — №11. — С. 70-74.
3. *Аракелян, Э.К.* Проблемы разработки и использования все-режимных компьютерных тренажеров в теплоэнергетике / Э.К. Аракелян, В.А. Рубашкин // Новое в российской электроэнергетике. — 2019. — № 6. — С. 6-11.
4. *Arakelyan, E.K.* The use of modern computer-based training-simulator complexes in the educational process / E.K. Arakelyan, A.V. Andriushin, S.V. Mezin, V.A. Rubashkin // 5th International conference on information technologies in engineering education, INFORINO 2020 — PROCEEDINGS.
5. *Magid, S.I.* Topical issues of simulation construction development in modern electric power engineering / S.I. Magid, E.N. Arkhipova, I.S. Zagretdinov // Thermal Engineering. — 2015. — Т.62. — № 14. — С. 1017-1027.
6. *Tverskoy, Yu.S.* The proof ground for automated process control systems of power stations: an efficient tool for training specialists and testing complex control systems / Yu.S. Tverskoy, A.V. Golubev, A.N. Nikonov // Thermal Engineering. — 2011. — №10. — P. 869-875.
7. *Marcano, L.* Review of simulator training practices for industrial operators: How can individual simulator training be enabled? / L. Marcano, F. Haugen, R. Sannerud, T. Komulainen // Safety Science. — V. 115, June 2019, Pp. 414-424.
8. *Тверской, Ю.С.* Опыт и особенности инновационной подготовки специалистов по автоматизации на полигоне АСУТП электростанций / Ю.С. Тверской, Е.С. Целищев, А.В. Голубев, А.Н. Никоноров, И.К. Муравьев // Автоматизация в промышленности. — 2019. — №9. — С. 14-20.
9. *Муравьев, И.К.* Технология и методология разработки поли-модельных комплексов для АСУТП энергоблоков с парогазовыми установками / И.К. Муравьев, Е.Д. Маршалов, А.Н. Никоноров, Д.В. Лаврентичев, Ю.С. Тверской // Вестник ИГЭУ. — 2018. — Вып. 3. — С. 20-28.
10. *Tverskoy, Yu S.* Control processes of CCGT power units gas turbines under conditions of changing operational and external climatic factors / Yury Tverskoy, Igor Muravev // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM).

*Никоноров Андрей Николаевич — канд. техн. наук, доцент,
Муравьев Игорь Константинович — канд. техн. наук, доцент,
Маршалов Евгений Дмитриевич — канд. техн. наук, доцент,
Муравьева Татьяна Евгеньевна — магистрант,*

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Контактный телефон (4932) 26-97-57.

E-mail: kafsu@su.ispu.ru