

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ГАЗОВОЙ И ПАРОВОЙ ТУРБИН ЭНЕРГБЛОКА С ПГУ¹

И.К. Муравьев, Ю.С. Тверской (ФГБОУВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина)

Рассматриваются результаты разработки и исследования многопараметрической нелинейной математической и имитационной моделей энергоблоков с парогазовыми установками (ПГУ) и оценка меры их адекватности как базового наукоемкого этапа развития методологии современной технологии сквозного проектирования систем управления.

Ключевые слова: технология функционального проектирования систем управления, парогазовые технологии, газотурбинная установка, эффективность энергоблока, режимные и внешние факторы, математическая модель, имитационная модель.

Современные АСУТП электростанций строятся на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры и служат единым системообразующим компонентом информационно-технологической среды управления энергоблоком. При этом синтез полноценных АСУТП требует, как правило, решения целого ряда междисциплинарных задач [1–4].

Особенно остро междисциплинарные проблемы проявились при освоении инновационных парогазовых технологий. Энергоблоки с парогазовыми установками (ПГУ) существенно поднимают эффективность использования топливо-энергетических ресурсов (рис. 1). Расчетные оценки КПД энергоблоков с ПГУ достигают 50...60%. Однако опыт эксплуатации, экспериментальные исследования показывают, что эффективность использования топлива весьма чувствительна к вариации режимных и внешних климатических факторов. Одним из таких факторов является температура наружного воздуха, ее естественные отклонения от расчетной (15°C) ведут к существенному снижению эффективности использования топлива и к неоправданным (до 10%) потерям [5 и др.].

Поэтому поиск факторов, влияющих на потерю эффективности инновационного оборудования, путей и методов решения проблем достижения расчетной (проектной) эффективности автоматизированного объекта, совершенствование алгоритмов управления, являются важными актуальными задачами освоения инновационных парогазовых технологий.

В выполняемых исследованиях эти задачи решаются путем развития методологии современной технологии сквозного проектирования систем управления [1]. Выделим несколько наукоемких этапов технологии на стадии функционального проектирования системы:

— 1 этап — анализ физических проблем структурного синтеза систем управления энергоблоком с ПГУ и их решение на основе методов обобщенного термодинамического анализа;

— 2 этап — задачи разработки соответствующей математической и имитационной моделей энергоблоков с ПГУ как открытого полимодельного комплекса и оценка меры адекватности получаемых результатов в рабочем диапазоне нагрузок блока;

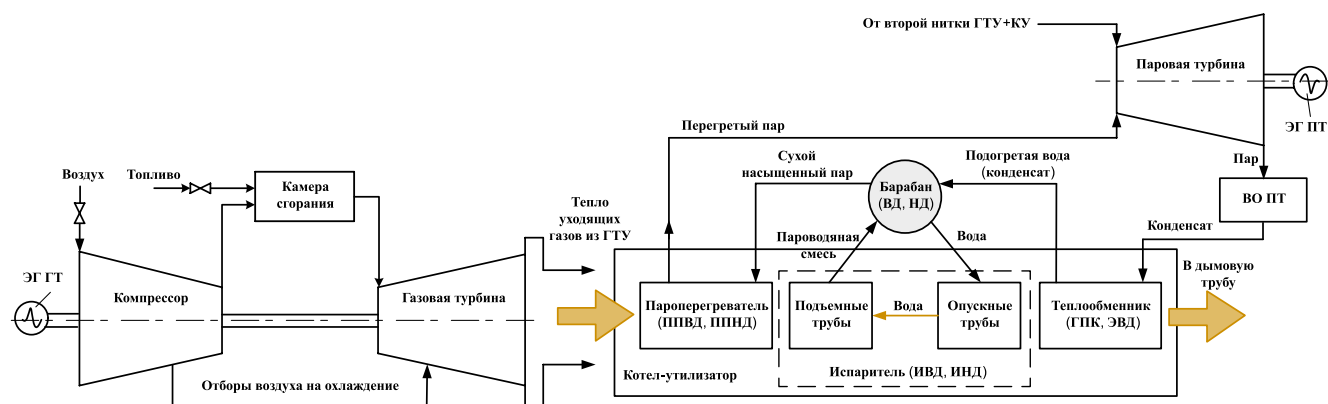


Рис. 1. Принципиальная схема энергоблока ПГУ:

ПГУ – газотурбинная установка; ЭГ – электрогенератор; ПТ – 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 – пароперегреватель высокого давления; ППНД – пароперегреватель низкого давления; ЭВД – экономайзер высокого давления; ГПК – газовый подогреватель конденсата.

¹ Исследования выполнялись при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-48-03215).

— 3 этап — использование полученных результатов первого и второго этапов для поиска ключевых факторов, влияющих на потерю эффективности инновационного оборудования, методами имитационного моделирования и вычислительного эксперимента;

— 4 этап — определяет работы, связанные с совершенствованием алгоритмов управления, включая структурный синтез новых автоматических систем регулирования (АСР) и разработку методики их настройки;

— 5 этап — исследование эффективности работы АСР с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов на математических моделях и полигонах.

Математическая и имитационная модели энергоблоков с ПГУ

Применение методов математического моделирования теплоэнергетических объектов позволяет многие проблемные вопросы, возникающие в процессе соз-

дания и эксплуатации автоматизированного оборудования, решать своевременно на более ранних стадиях проектирования.

Математическая модель энергоблока с ПГУ как комплекса взаимосвязанного оборудования включает следующее оборудование и протекающие в них 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);

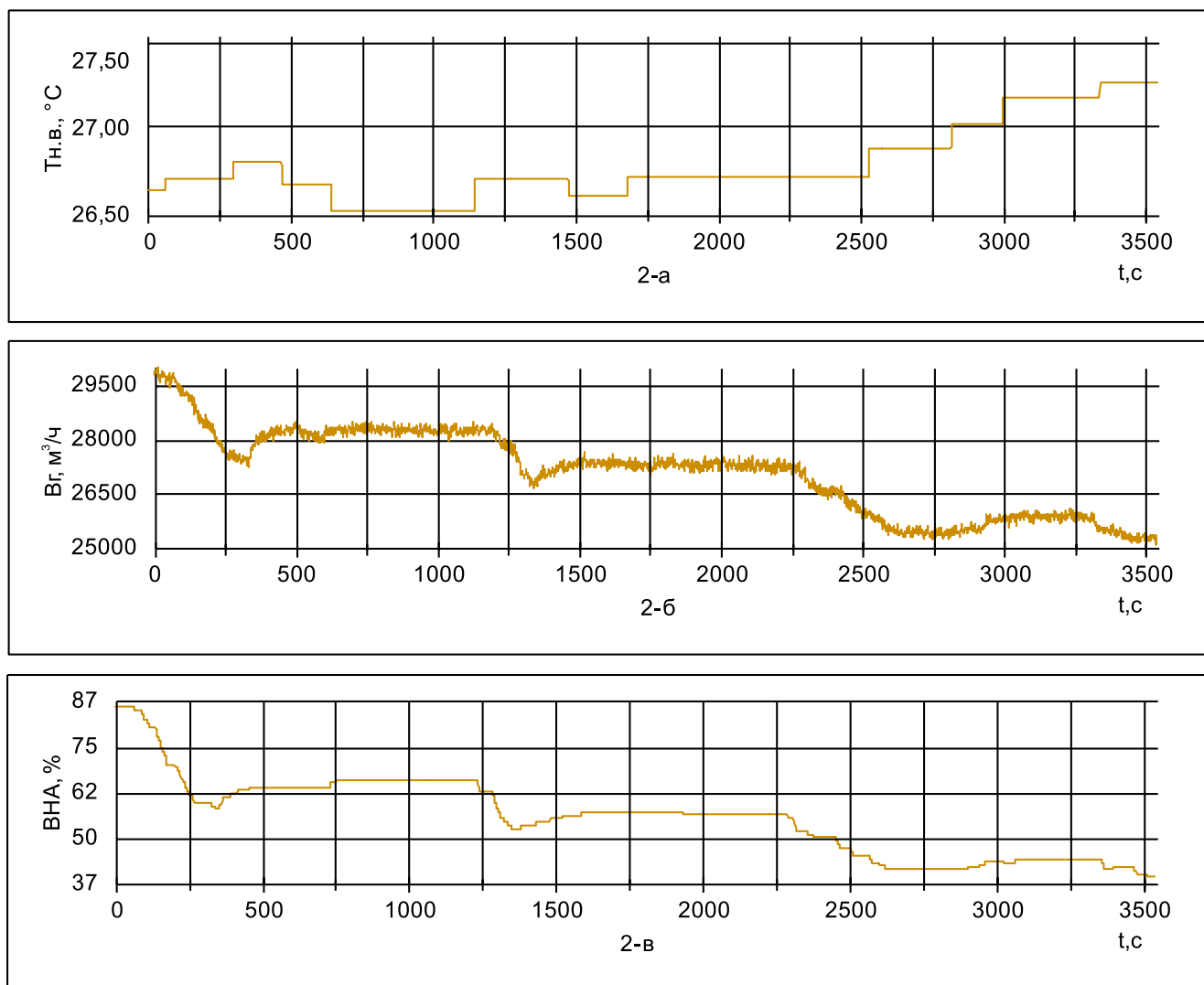


Рис. 2 Входные тренды: а – температура наружного воздуха; б – расход топлива в камере сгорания ГТ; в – процент открытия входного направляющего аппарата компрессора ГТ

— конденсационная установка (процесс конденсации пара).

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 бло-

ках ПГУ при различном составе оборудования. В работе рассмотрены математические модели отечественного дубль-блока ПГУ-325 и получившего широкое распространение дубль-блока ПГУ-450.

При разработке математической модели применен феноменологический подход, который в своей теоретической основе базируется на законах сохранения неравновесной термодинамики и результатах обоб-

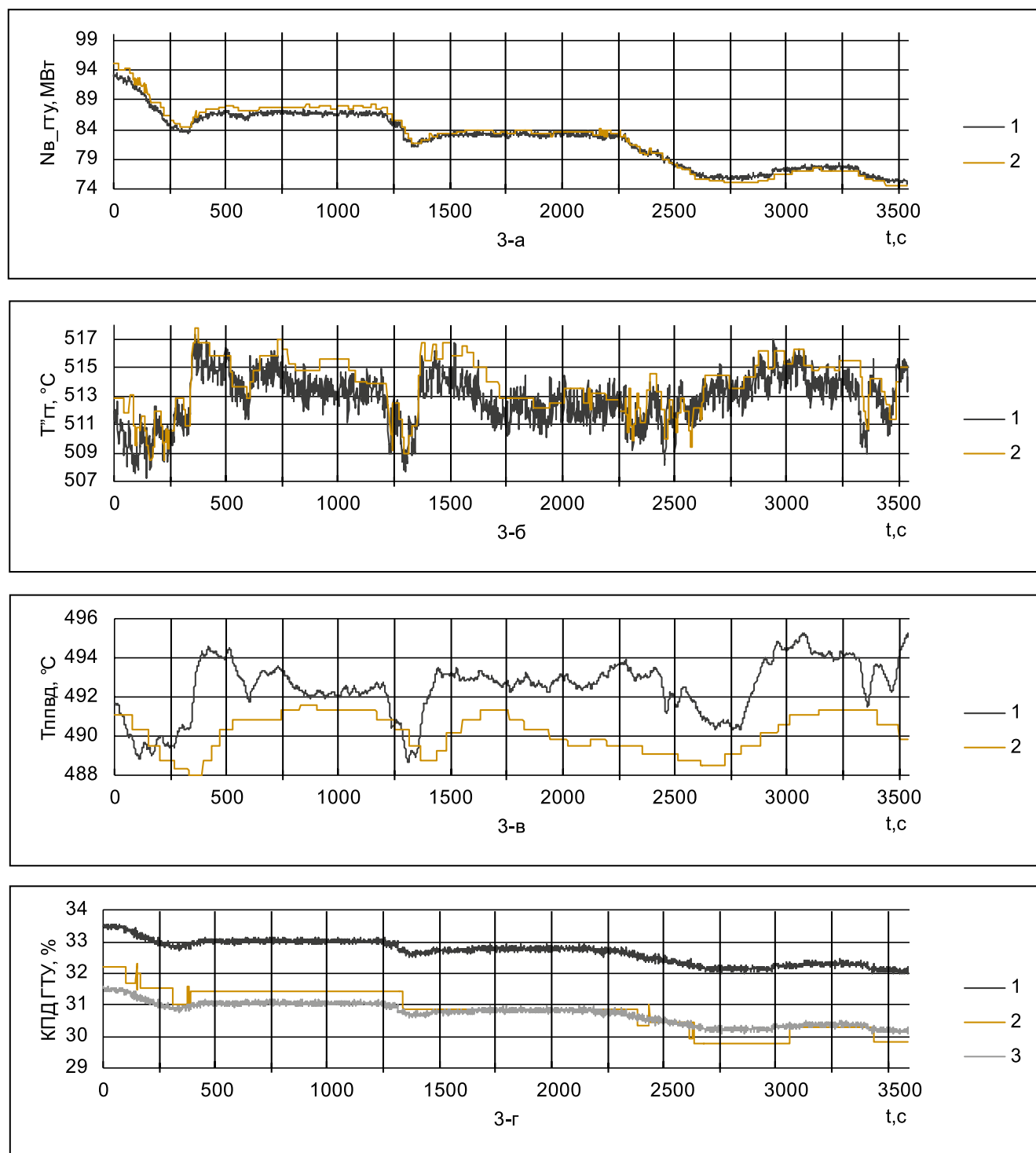


Рис. 3. Исследование результатов модели энергоблока ПГУ: 1 – модель; 2 – реальная эксплуатация; 3 – модель, расчет КПД по алгоритму АСУП; а – электрическая мощность ПГУ; б – температура уходящих (дымовых) газов за ПТ; в – температура перегретого пара контура ВД; г – КПД ПГУ

шенного термодинамического анализа эффективности энергоблока ПГУ. Это позволило использовать фундаментальную физико-математическую основу и строго оценить влияние принимаемых допущений на качество конечного результата.

Уравнения состояния определены конструктивными и режимными параметрами оборудования. Иными словами, при построении математической модели использованы принципы 4-го поколения современного тренажеростроения [1, 6].

В результате разработана многопараметрическая нелинейная математическая модель энергоблока ПГУ, представленная в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния. Дополнительно (по результатам обобщенного термодинамического анализа эффективности энергоблока) модель включает расчет тепловых потоков дымовых газов и массового расхода воздуха, поступающего в компрессор ГТУ, а также оперативный расчет технико-экономических показателей энергоблока в целом и его технологического оборудования.

Методика настройки сложной многопараметрической модели (полимоделного комплекса) энергоблока с 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.

Оценки адекватности математической модели энергоблока с ПГУ в рабочем диапазоне нагрузок

Оценка меры адекватности математической модели (полимоделного комплекса) выполнялась в несколько шагов [6,7]:

— по результатам тепло-гидравлического расчета с использованием статических данных, полученных по результатам тепло-гидравлических расчетов оборудования при нагрузке ГТУ 75% и 100%;

— по экспериментальным характеристикам с использованием трендов испытательного и эксплуатационного режимов из архива АСУТП. Для этого уточнялись коэффициенты модели при нагрузке ГТУ, равной 75% и 100%, а также устанавливались входные параметры в модели на значения согласно испытаниям. Основными уточняемыми коэффициентами являлись: коэффициенты теплоотдачи, объемы уходящих газов и перепады давлений в поверхностях нагрева КУ, начальные условия интеграторов и ряд варьируемых входных параметров (потеря давления на всасе компрессора, низшая теплота сгорания то-

плива, относительные внутренние КПД: компрессора, КС и ГТ). Расход топлива изменялся с 4,94 кг/с до 6,12 кг/с согласно заданной скорости изменения нагрузки ГТ в соответствии с инструкцией по эксплуатации ГТУ;

— на соответствие режимной карте.

Далее, в соответствии с протоколом эксплуатации энергоблока ПГУ-325, на вход модели подавали реальные тренды из архива АСУТП (рис. 2). На выходе результаты модели сравнивались с выходными трендами ТОО из архива АСУТП (рис. 3).

Анализ полученных результатов исследований показывает:

— электрическая мощность ГТУ (рис. 3 а) как интегрированный показатель качества разработанной математической модели совпадает с эксплуатационным трендом достаточно точно;

— реальный тренд изменения температуры дымовых газов за турбиной (рис. 3 б, график 2) является огибающим (ограничивающим) для результата, полученного на модели (рис. 3 б, график 1); объясняется требованием инструкций к поддержанию температуры дымовых газов за турбиной (перед КУ) на постоянном уровне, связанное с надежностью работы блока в целом;

— характер изменения температуры перегретого пара высокого давления (рис. 3 в) 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 перегретого пара высокого давления КУ от эксплуатационного на величину 5 °С не является критическим, поскольку не оказывает существенного влияния на конечный результат моделирования энергоблока ПГУ;

— коэффициент полезного действия ГТУ модельный (рис. 3 г, график 1) устанавливается на 1,5% выше эксплуатационного (рис. 3 г, график 2); объясняется это тем, что подсчет выполнен по разным формулам. В первом случае (рис. 3 г, график 1) по классической формуле (как отношение полезной работы к затраченной на ее производство энергии), во втором случае (рис. 3 г, график 2) по формуле, заложенной в расчет ПТК АСУТП, и учитывающей температуру поступающего топлива. Расчет модельного значения КПД ГТУ по этой же формуле (рис. 3 г, график 3) практически совпадает с эксплуатационным трендом, что подтверждает качество математической модели.

Количественная оценка меры адекватности определялась путем нахождения значений абсолютных и относительных погрешностей для определяющих параметров (рис. 3). 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 — соответственно 0,88%, 0,92%, 5,62%; по КПД блока — 1,8%.

Таким образом, результаты анализа проведенных многосторонних исследований показали, что математическая и имитационная модели обладают высокой точностью и могут быть использованы для выполнения последующих содержательных этапов функционального проектирования систем управления энергоблоков с ПГУ.

Выводы

Математическая модель энергоблоков с ПГУ, представленная в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния, реализована в виде открытого полимодельного комплекса. Математическая модель доведена до уровня имитационной модели, обладает единой структурой и определенной инвариантной частью, позволяющей моделировать работу энергоблока, при различном составе оборудования. Разработана методика и определена интегрированная оценка адекватности полимодельного комплекса.

Муравьев Игорь Константинович — старший преподаватель кафедры систем управления ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».
 Контактный телефон (4932) 26-97-58.
 E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Список литературы

1. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Под общей ред. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». Иваново, 2013. Кн.1. 260 с. Кн.2. 436 с. Кн.3. 176 с.
2. *Тверской Ю. С., Таламанов С. А.* Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций//Теплоэнергетика. 2010. № 10. С. 37-44.
3. *Ицкович Э. Л.* Типичные недостатки внедрения и эксплуатации АСУТП//Автоматизация в промышленности. 2012. № 1. С. 5-9.
4. *Ольховский Г. Г.* Энергетические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат, 1985. 304 с.
5. *Давыдов А. В., Радин Ю. А.* Опыт освоения парогазовых энергоблоков ПГУ-450Т//Электрические станции. 2009. № 9. С. 22-26.
6. *Тверской Ю. С., Муравьев И. К.* Создание математической модели и расчет характеристик энергоблока ПГУ // Моделирование-2012: Сб. трудов IV Междунар. науч. конф. Киев: Ин-т проблем моделирования в энергетике. 2012. С. 297-303.
7. *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 Седьмой Всероссийской научно-практ. конф. М.: ФГБН «Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова». 2015. Т. 2. С. 357-360.

Тверской Юрий Семенович — д-р техн. наук, проф.,
Муравьев Игорь Константинович — старший преподаватель кафедры систем управления ФГБОУВПО
«Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина».
 Контактный телефон (4932) 26-97-58.
 E-mail: kafsu@su.ispu.ru

В России создана инновационная платформа для разработки сервисных коммерческих роботов

Компании Мивар (Москва) и «Интеллектуальные технологии» (г. Нальчик) создали многоцелевую робототехническую платформу «Муром-ИСП». Платформа предназначена для проведения исследований в области интеллектуальной робототехники, а также создания новых образцов сервисных коммерческих роботов.

Специалисты компаний Мивар и «Интеллектуальные технологии» разработали отечественную платформу, которая открывает возможности для массового производства коммерческих роботов в России. На базе платформы будет апробирована интеллектуальная система управления роботами собственной разработки, проверена возможность их работы в группе и оценены перспективы применения в различных отраслях. Роботы, созданные на основе этой платформы, могут применяться в ритейле, строительстве, сельском хозяйстве, в частных домовладениях, рекламном бизнесе, охране правопорядка, медицине, гостиничном бизнесе, при ликвидации ЧС и т. д. В настоящий момент у платформы «Муром-ИСП» нет аналогов ни в России, ни за ее пределами.

«Муром-ИСП» — это гибрид андроида и колесного робота: складывающееся антропоморфное тело с сенсорной головой установлено на самобалансирующееся одноосное двухколесное шасси. В разложенном состоянии высота робота 165 см, в сложенном — 80 см. Складное туловище позволило существенно расширить рабочую зону машины, обеспечило возможность проезжать под препятствиями в сложенном состоянии. Теперь робот может осуществлять манипуляции как у поверхности земли, так и на уровне головы. Платформа может оснащаться различными

видами рабочих органов (от манипуляторов до специализированных инструментов). Расчетная грузоподъемность антропоморфного туловища — до 13,5 кг (включая вес рабочих органов).

Двухколесное шасси обеспечивает платформе высокую маневренность, позволяет передвигаться со скоростью до 15 км/ч и везти до 100 кг полезной нагрузки. Роботы, созданные на базе «Муром-ИСП», могут применяться как внутри помещений, так и на улице. Время работы в автономном режиме при среднем уровне загрузки — до 8 ч.

Платформа оборудована широким набором сенсоров и эффекторов: дальномерами, инерционными датчиками, системами глобального позиционирования, осветительной техникой, аудиосистемой с микрофонами и динамиками и прочими. В антропоморфное туловище смонтирован сенсорный дисплей для улучшения интерактивности взаимодействия человека с машиной. Она оснащена мощным бортовым вычислителем, поддерживающим одновременную и взаимосвязанную работу до пяти вычислительных модулей. В дальнейшем для управления платформой предполагается использовать систему автономного искусственного интеллекта, разрабатываемую компанией Мивар.

Универсальность, функциональность и практичность платформы открывает возможности для массового производства. Потенциально спектр применения роботов очень широк. В частности, платформа может стать неотъемлемым элементом системы «умный город», выступая одновременно в нескольких ипостасях: гид, консультант, курьер, промоутер, инспектор охраны правопорядка, ремонтник и даже робот-дворник.

[Http://www.mivar.ru](http://www.mivar.ru)