

УДК 621.311.238:681.513.6

**Б.В. Кавалеров, И.В. Бахирев, Г.А. Килин, Е.А. Маталасова**Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия**О ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯМИ НА БАЗЕ КОНВЕРТИРОВАННЫХ  
АВИАЦИОННЫХ ГТУ**

В настоящее время авиационные газотурбинные установки широко используются для создания электростанций мощностью до 25 МВт. Системы управления газотурбинными установками строятся во многом по аналогии с авиационными прототипами. Но в электрической сети часто происходят заранее непредсказуемые изменения режимов работы. Меняются нагрузка электростанции и условия ее работы. Поэтому в качестве резерва для улучшения характеристик САУ ГТУ целесообразно рассмотреть возможности использования принципа адаптивного управления. В статье намечаются основные задачи проведения такого исследования.

**Ключевые слова:** газотурбинная электростанция, электроэнергетическая система, адаптивное управление, моделирование, идентификация, оптимизация.

**B.V. Kavalеров, I.V. Bahirev, G.A. Kilin, E.A. Matalasova**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**ABOUT THE TASKS OF THE RESEARCH ADAPTIVE CONTROL  
POWER STATIONS BASED ON CONVERTED AVIASPACE  
MICROTURBINES**

In present the aviation gas-turbine units are widely used for creation of electro station by power up to 25 MW. Control system of gas-turbine units built mainly by analogy with aviation prototypes. But in electric system frequently happen beforehand unpredictable work mode change. Electro station load change and change her operating conditions. Therefore, as a reserve to improve the performance of ACS GTU is useful to consider the possibility of using the principle of control. In article outlines the main objectives for carrying out that research.

**Keywords:** gas-turbine electro station, electro power system, adaptive control, modeling, identification, optimization.

**Введение.** Важным и перспективным направлением развития отечественной энергетики является создание «умных» активно-адаптивных сетей электроснабжения, объединяющих разнородные

генерирующие мощности: крупные и малые электростанции, возобновляемые и нетрадиционные источники электроснабжения. При этом, по оценке специалистов, все более значительную роль будут играть газотурбинные электростанции мощностью до 20 МВт, создаваемые на базе авиационных газотурбинных установок (ГТУ). Такие ГТУ, преобразованные для наземной работы, часто называют конвертированными. Они вращают синхронные генераторы, вырабатывающие электроэнергию, поэтому именно они являются источником мощности газотурбинных электростанций. Рассмотрим необходимость исследования адаптивного управления такими газотурбинными электростанциями для последующего построения надежных активно-адаптивных систем электроснабжения. В дальнейшем предполагается разработка программного компьютерного комплекса, реализующего новые методики. Совокупность методик должна составить единую методологическую базу построения систем управления газотурбинными электростанциями для «умной» энергетики, в первую очередь ориентироваться на методы, которые отвечают возможности создавать быстродействующие и практически реализуемые алгоритмы адаптации. Важной отличительной особенностью создаваемой методологической базы является включение в рассмотрение не только целевых показателей, собственно ГТУ, но и целевых показателей всей энергосистемы за счет совместного рассмотрения совокупности процессов во всей объединенной динамической системе: в ГТУ, в синхронных генераторах, в элементах линии электропередач и нагрузки. Опубликованные в статье результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России № 13.832.2014/К.

**Актуальность исследований.** Пермский край является признанным мировым центром высокотехнологичного производства газотурбинных установок. Здесь выпускают ГТУ различного назначения: для авиации, для электростанций, для газоперекачивающих агрегатов, для использования в качестве микротурбин. Любая из перечисленных ГТУ, и в частности ГТУ для электроэнергетики, является работоспособной только при наличии системы автоматического управления (САУ) ГТУ, поскольку именно характеристики САУ определяют качественные и количественные показатели работы ГТУ в конкретных условиях эксплуатации, а также при учете взаимовлияния САУ ГТУ и САУ СГ.

В связи с диверсификацией производства и, прежде всего, с выпуском наземных ГТУ специалистами профильных предприятий проделана значительная и успешная работа по созданию новых САУ и приспособлению характеристик существующих прототипов ГТУ к работе в составе электростанции. К настоящему времени накоплены результаты, позволяющие сделать вывод, что для существенного и системного улучшения характеристик САУ ГТУ необходимо глубже и смелее внедрять адаптивный подход при построении САУ, и с этой целью развивать соответствующие научные основы для формирования методической базы создания перспективных САУ ГТУ. Адаптация здесь рассматривается прежде всего применительно к самонастройке и самоорганизации САУ при изменении характеристик ГТУ и внешней среды с учетом поведения электрической нагрузки.

Очевидно, что одновременно значительно повышаются требования к таким ГТУ – электростанциям, работающим в единой системе с другими источниками энергии и при все более широком использовании активных элементов, изменяющих топологические параметры сети. Известно, что системы управления двух основных силовых модулей электростанции: газотурбинной установки и синхронного генератора (СГ) на практике нередко конфликтуют между собой, что может приводить к аварийным ситуациям [1]. Поэтому сегодня необходимо преодолеть означенную проблемную ситуацию путем разработки таких систем управления, с помощью которых электростанция сможет сама приспособливаться к изменению режимных ситуаций. А это означает, что следует разработать методики и алгоритмы построения адаптивных систем управления ГТУ в составе электростанции и электроэнергетической системы.

**Адаптивный подход.** На протяжении последних десятилетий адаптивный подход в управлении непрерывно развивался, ему посвящены многочисленные отечественные и зарубежные публикации, патенты, однако практика его использования в системах управления газотурбинными электростанциями отстает от теоретически возможных результатов. По-видимому, одной из причин является недостаточное использование системного подхода. В литературе неоднократно отмечалось, в частности в работах профессора МЭИ В.Я. Роточа [2, 3], что многие схемы идентификации и адаптации нередко работают только «на бумаге» и в идеальных условиях, т.е. оторваны

от реальных экспериментальных условий. Помимо этого при выборе целей адаптации необходимо использовать системный принцип соответствия. Нередко имеет место конфликт целей, например, рассчитанное и от моделированное оптимальное управляющее воздействие, как показывает опыт, может приводить к преждевременному выходу из строя энергоустановки из-за износа подвижных, трущихся частей.

При проектировании САУ необходимо учитывать известный системный парадокс, который состоит в том, что для получения модели объекта необходимо знать алгоритм функционирования управляющего устройства, для отыскания которого собственно и нужна модель объекта. Отметим, что при использовании принципа адаптации для уже включенной в работу системы это противоречие в определенной мере снимается за счет последовательного приближения к оптимальному решению. Существует несколько известных путей решения проблемы.

Поскольку при изменении нагрузки меняются не свойства объекта управления, а только его линейная модель, теоретически возможно построение нелинейной САУ, например, по технологии табличной настройки. Но в этом случае потребуется ее последующая адаптация для уточнения данных табличных зависимостей. Теоретически возможно построение полностью адаптивных САУ, но здесь возникает известная проблема, связанная с медленным действием контура адаптации, что ограничивает управление областью медленных изменений свойств управляемого объекта. Использование обычных неадаптивных САУ приводит к большим срокам внедрения, затягиванию испытаний, трудностями в настройке и подстройке САУ ГТУ, такие системы оказываются достаточно жестко привязаны к конкретным условиям эксплуатации. В противоположность этому внедрение адаптивных систем позволяет даже при существенной нелинейности и нестационарности параметров повысить стабильность динамических характеристик, сократить сроки внедрения, облегчить наладку САУ и повысить их качество [3, 4].

Поэтому целесообразен следующий путь разрешения сложившейся ситуации: в рамках системного подхода при построении систем управления электростанциями рассмотрению подвергается не одна ГТУ, но также и СГ, и вся энергоустановка в целом с учетом влияния разнородной нагрузки, режимов и топологии электроэнергетической системы.

В современных условиях такая задача удовлетворительно разрешается с использованием математического моделирования, при этом благодаря применению современной компьютерной техники нет принципиальных препятствий для построения соответствующих математических моделей, структурно и параметрически настраиваемых. Таким образом, существующие и развиваемые методы идентификации, оптимизации, адаптации позволяют разработать методическую базу применительно к новой постановке общей задачи. Кроме того, известно, что современные системы управления все активнее используют технологии «soft-computing»: нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы и др. [4]. Однако основным недостатком таких систем управления является сложность их настройки, куда относятся и составление баз нечетких правил, проблемы обучения нейронной сети [5]. Поэтому в таких системах также целесообразно использовать принцип адаптации для снижения трудоемкости настройки и создания перспективных САУ, опирающихся на совместное использование различных подходов к управлению ГТУ.

**Задачи исследования.** Перечислим основные задачи, которые намечены к решению при разработке перспективных адаптивных САУ. Вначале исследуются традиционные принципы управления, оценивается проблемная ситуация, затем производится поиск оригинальных решений, выполняются программная реализация и апробация. Выделяются следующие шесть задач:

1. Исследование возможностей и ограничений традиционных принципов раздельного управления ГТУ и СГ (рис. 1). Введение элементов адаптации в традиционные методики управления.

Под элементами адаптации понимается исследование известных, ранее апробированных подходов: автоматически настраиваемых коэффициентов САУ, вариантов табличной настройки и т.п.

2. Исследование возможностей традиционных принципов управления с элементами адаптации во взаимосвязанных САУ ГТУ и САУ СГ (рис. 2) при учете динамики энергоустановки в различных режимах работы и топологиях электросети.

Использование перекрестных связей может предоставлять дополнительные возможности для улучшения характеристик САУ, здесь необходимо исследовать возможности и проблемы, сопутствующие этой схеме управления.

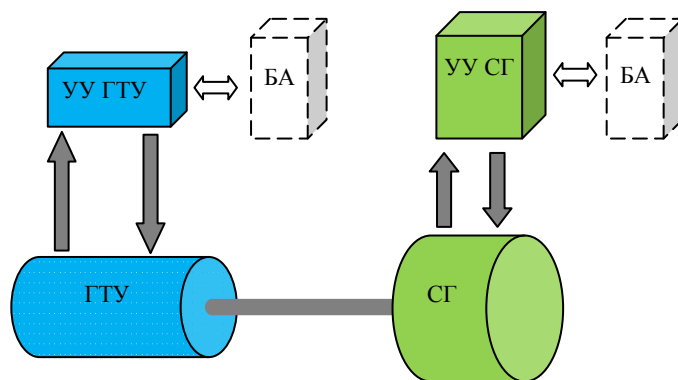


Рис. 1. Раздельное управление (ГТУ – газотурбинная установка, СГ – синхронный генератор, УУ – устройство управления, БА – блок адаптации)

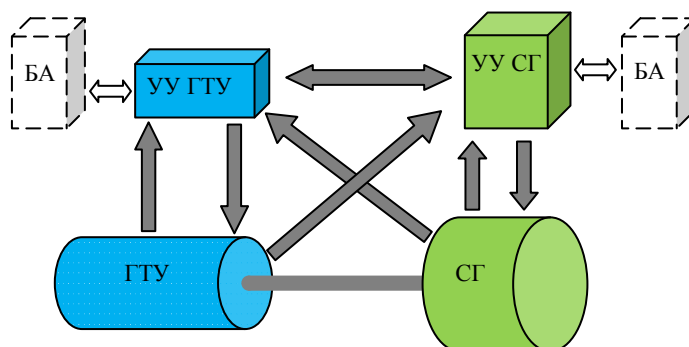


Рис. 2. Совместное управление

3. Исследование возможностей технологии «soft-computing»: нейронные сети, нечеткая логика, генетические алгоритмы с элементами адаптации при использовании в САУ при учете динамики электросистем в различных режимах работы и топологиях.

Сюда, например, относится автоматическая настройка с помощью блока нечеткой логики (рис. 3) [4].

Блок нечеткой логики (фаззи-блок) использует базу правил подстройки и методы нечеткого вывода. Отметим, что блок автонстройки может быть выполнен и на основе нейронной сети. Для оптимизации могут использоваться генетические алгоритмы. Учет динамики и топологий электросети целесообразно проводить с использованием моделирования.

4. Разработка алгоритмов идентификации и оптимизации для адаптивного управления электростанциями с учетом динамики активно-адаптивной («умной») сети.

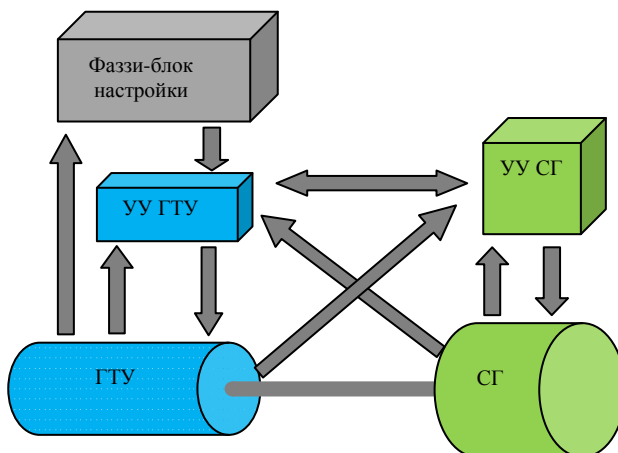


Рис. 3. Совместное управление с блоком автонастройки на основе нечеткой логики

Поскольку проведение широкого спектра натуральных экспериментов в системе электроснабжения, в том числе с исследованием аварийных режимов, затруднительно, необходимо использовать математическое моделирование электроэнергетической системы (ЭЭС). Такую модель ЭЭС целесообразно строить как двухуровневую (рис. 4.): вначале на структурно-сложной модели получать динамические характеристики выбранного режима работы, а затем методами идентификации получать упрощенную «быстрорешаемую» модель этого режима. Такая быстрорешаемая модель ЭЭС используется для настройки адаптивного управления ГТУ – электростанции [7, 8].

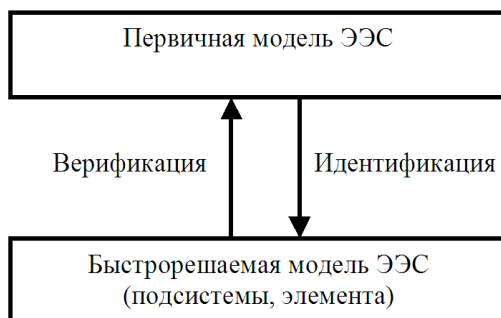


Рис. 4. Иерархия моделей

Производится поиск такой быстрорешаемой модели, чтобы с точностью до некоторой малой ошибки  $\varepsilon$  исходная первичная модель в некоторой ограниченной области изменения переменных и некоторой ограниченной области времени  $\tau$  (т.е. в каком-то конкретном режиме работы) была эквивалентна системе линейных дифференциальных уравнений с постоянными матрицами **A** и **B** коэффициентов:

$$\dot{\mathbf{X}}_1(t) = \mathbf{A}\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}_1(t), \quad (1)$$

Структура и ранговые свойства матриц **A** и **B** быстрорешаемой модели (1) определяют условия управляемости, наблюдаемости и идентифицируемости системы [9, 10]. Модель (1) – наиболее простая (линейная стационарная), определенная на ограниченной (из условия допустимого  $\varepsilon$ ) области отклонений переменных. Здесь **X** – вектор переменных состояния, **U** – вектор внешних воздействий, индекс 1 при векторах обозначает, что эти векторы редуцированы относительно исходных векторов первичной нелинейной модели топологически структурированной модели.

Более сложными по сравнению с (1) являются линейные нестационарные модели:

$$\dot{\mathbf{X}}_1(t) = \mathbf{A}(t)\mathbf{X}_1(t) + \mathbf{B}(t)\mathbf{U}_1(t), \quad (2)$$

справедливые для конечных областей изменения переменных со сложной или линейной нестационарностью коэффициентов матриц **A(t)** и **B(t)**.

Также более сложными по сравнению с (1) будут являться нелинейные стационарные модели:

$$\dot{\mathbf{X}}_1(t) = f(\mathbf{X}_1(t), \mathbf{U}_1(t)), \quad (3)$$

справедливые для конечного промежутка времени  $\tau$ .

Поскольку модель (3) сохраняет адекватность (из условия допустимого  $\varepsilon$ ) в ограниченной области отклонений переменных, система ограничений по допустимому  $\varepsilon$  дополняется системой ограничений на область допустимых по условиям адекватности отклонений переменных модели при испытании и настройке САУ.

В том случае, если для выбранной модели заданные ограничения не выполняются, следует выбрать более сложную быстрорешаемую модель.



5. Создание программного комплекса для испытания и настройки адаптивных алгоритмов управления.

Специализированные программные комплексы (ПК) строятся на основе разработанных моделей с открытой архитектурой, позволяющей внедрить в его структуру требуемые алгоритмы моделирования, идентификации, настройки, оптимизации и адаптации. Примером такого комплекса является ПК «ЭлектроДин» (рис. 5) [11], разработанный для ОАО «Протон-ПМ». Такие программные комплексы являются удобным инструментом для предварительного исследования регуляторов САУ и модельной проверки принимаемых решений. Но для изучения перспективных решений в рамках создаваемых алгоритмов адаптации планируется создать новый программный комплекс, учитывающий специфику адаптивных САУ для «умной» энергетики.

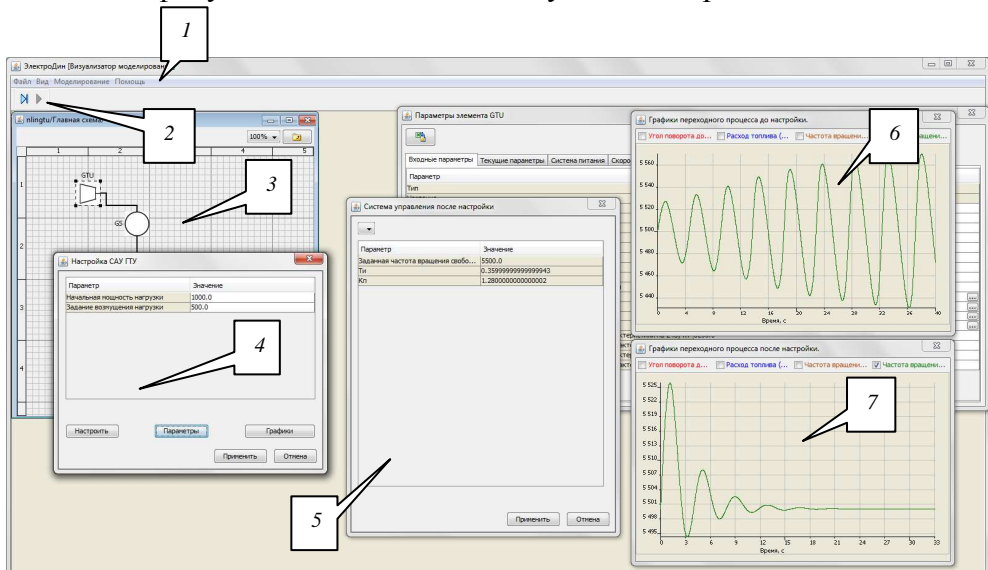


Рис. 5. Модуль настройки традиционных регуляторов САУ в составе

ПК «ЭлектроДин» включает: 1 – главное меню приложения «Визуализатор моделирования», 2 – панель моделирования, 3 – окно отображения схемы проекта, 4 – главное меню модуля настройки САУ ГТУ, 5 – окно отображения настроенных параметров САУ, 6 – окно отображения результатов до настройки, 7 – окно отображения результатов после настройки.

6. Разработка комплекса методик адаптивного управления для построения перспективных САУ для «умной» энергетики. Эта задача

рассматривается как перспективная в плане повышения надежности электроснабжения и энергоэффективности [12].

Теоретические и прикладные исследования предполагается провести с учетом предложенной концептуальной модели оптимизации и настройки САУ наземными ГТУ [6], где в соответствии с системным принципом интеграции предусмотрено согласование этапов создания САУ ГТУ – электростанций с основными задачами оптимизации и настройки САУ: моделирование, идентификация, настройка, оптимизация, проведение испытаний. Для решения этих задач необходимы новые методики, модели и алгоритмы моделирования, идентификации, оптимизации и настройки САУ ГТУ – электростанций, которые в перспективе должны войти в состав математического обеспечения технических средств, взаимодействующих с подсистемами автоматизированных испытаний. Новые методики и алгоритмы формируются на основе системного подхода. Таким образом, в соответствии с принципом совместимости обеспечивается связь испытаний, моделирования и структурно-параметрического синтеза САУ, предоставляются совместимые инструменты моделирования, идентификации моделей, оптимизации и настройки САУ наземными ГТУ – электростанциями.

**Заключение.** В результате намеченных исследований формируются новые методики и алгоритмы идентификации и оптимизации для адаптивного управления электростанциями, запланирован к созданию оригинальный многофункциональный программный комплекс, содержащий разработанный инструментарий для испытания и настройки адаптивных алгоритмов управления наземными ГТУ – электростанциями.

### **Библиографический список**

1. Исследование взаимовлияния систем управления газотурбинной установкой и электрогенератором при автоматизированной настройке регуляторов / А.И. Полулях, И.Г. Лисовин, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов // Вестник Воронеж. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 7. – № 11.1. – С. 129–132.
2. Автоматизация настройки систем управления / В.Я. Ротач, В.Ф. Кузицин, А.С. Клюев [и др.]; под ред. В.Я. Ротача. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
3. Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 400 с.

4. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – 608 с.

5. Бахирев И.В., Кавалеров Б.В. Исследование варианта структуры нечеткого ПИД-регулятора частоты вращения электроэнергетической газотурбинной установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь, 2014, №1(9). – С. 16–24.

6. KavaleroV B.V. Automatic control systems for gas-turbine units in mini power stations: Testing automation at the stages of design and tuning // Automation and Remote Control. – 2013. – Vol. 74, Iss. 11. – P. 1890–1897.

7. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 216 с.

8. Кавалеров Б.В., Петроченков А.Б. Моделирование электрической нагрузки для настройки систем управления конвертированными газотурбинными установками // Электротехника. – 2011. – № 11. – С. 11–16.

9. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1987. – 712 с.

10. Сильверстов А.Н., Чинаев П.И. Идентификация и оптимизация автоматических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 200 с.

11. Св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ № 2012660288 РФ. «ЭлектроДин» / А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, К.А. Один, И.А. Арбузов, Д.В. Щенятский, А.Н. Рязанов. Дата регистр. 14.11.2012.

12. Филиппов М.В., Кавалеров Б.В. К вопросу интеллектуализации локальных электрических сетей с газотурбинными мини-электростанциями // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – Пермь, 2014. – № 1(9). – С. 115–133.

## References

1. Poluliakh A.I., Lisovin I.G., KavaleroV B.V., Shigapov A.A. Issledovanie vzaimovliianiia sistem upravleniia gazoturbin-noi ustanovkoi i elektrogeneratorom pri avtomatizirovannoi nastroiKe reguliatorov [Research of interference of control systems of gas-turbine installation and the electric gen-

erator at the automated setup of regulators]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2011, vol. 7, no 11.1, pp. 129-132.

2. Rotach V.Ia., Kuzishchin V.F., Kliuev A.S. *Avtomatizatsiia nastroiiki sistem upravleniia* [Automation of configuration control systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 272 P.

3. Rotach V.Ia. *Teoriia avtomaticheskogo upravleniia* [Theory of automatic control]. Moscow: Izdatel'stvo Moskovskogo ekonomicheskogo instituta, 2005, 400 P.

4. Denisenko V.V. *Komp'iuternoe upravlenie tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniem* [Computer management of technological process, experiment, equipment]. Moscow: Goriachaia liniia-Telekom, 2009, 608 P.

5. Bakhirev I.V., Kavalеров B.V. *Issledovanie varianta struktury nechetkogo PID-regulatora chastoty vrashcheniia elektroenergeticheskoi gazoturbinnoi ustanovki* [Research of option of structure of the indistinct PID-regulator of frequency of rotation of electrical power gas-turbine installation] *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2014, no. 1(9), pp. 16-24.

6. Kavalеров, B.V. *Automatic control systems for gas-turbine units in mini power stations: Testing automation at the stages of design and tuning. Automation and Remote Control*. 2013, vol. 74, no. 11, pp. 1890-1897.

7. Bortsov Iu.A., Poliakhov N.D., Putov V.V. *Elektromekhanicheskie sistemy s adaptivnym i modal'nym upravleniem* [Electromechanical systems with adaptive and modal management]. Saint-Petersberg: Energoatomizdat, 1984, 216 P.

8. Kavalеров B.V., Petrochenkov A.B. *Modelirovanie elektricheskoi nagruzki dlia nastroiiki sistem upravleniia konvertirovannymi gazoturbinnymi ustanovkami* [Modeling of electric loading for control of control systems of the converted gas-turbine installations]. *Elektrotekhnika*, 2011, no. 11, pp. 11-16.

9. Krasovskii A.A. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniia* [Reference book on the theory of automatic control]. Moscow: Nauka: Glavnaia redaktsiia fiziko-matematicheskoi literatury, 1987, 712 P.

10. Sil'verstov A.N., Chinaev P.I. Identifikatsiia i optimiza-tsiia avtomaticheskikh system [Identification and optimization of automatic systems]. Moscow: Energoatomizdat, 1987, 200 P.

11. Petrochenkov A.B., Kavalerov B.V., Odin K.A., Arbuzov I.A., Shcheniatskii D.V., Riazanov A.N. Svidetel'stvovo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia elektro-vychislitel'noi mashiny № 2012660288 RF. «ElektroDin» [Certificate of state registration of the computer № 2012660288 Russian Federation "ElektroDin"]. 14 November 2012.

12. Filippov M.V., Kavalerov B.V. K voprosu intellektualizatsii lokal'nykh elektricheskikh setei s gazoturbinnymi mini-elektrostantsiiami [To a question of intellectualization of local electric networks with gas-turbine mini-power plants]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*. Perm', 2014, no. 1(9), pp. 115-133.

### **Сведения об авторах**

**Кавалеров Борис Владимирович** (Пермь, Россия) – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: kbv@pstu.ru).

**Бахирев Иван Владимирович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: bahirvy@mail.ru).

**Килин Григорий Александрович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: thisisforasm@rambler.ru).

**Маталасова Елена Афонасьевна** (Пермь, Россия) – инженер кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: shulakov@pstu.ru).

### **About the authors**

**Kavalero Boris Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) is Doctor of Technical Sciences, Associate Professor the Head of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: kbv@pstu.ru).

**Bahirev Ivan Vladimirovich** (Perm, Russian Federation) post graduate student of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: bahirevy@mail.ru).

**Kilin Grigory Alexandrovich** (Perm, Russian Federation) post graduate student of the Department of Electrical Engineering and Electromechanics Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: thisisforasm@rambler.ru).

**Matalasova Elena Afonasevna** (Perm, Russia) engineer of the Department of Electrical and Electromechanical Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: shulakov@pstu.ru).

Получено 12.09.2014