

УДК 681.51.001.57

Г.А. Килин, Б.В. Кавалеров, К.А. ОдинПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА В ЗАДАЧАХ
НАСТРОЙКИ И ОПТИМИЗАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ГАЗОТУРБИНЫМИ УСТАНОВКАМИ**

В данной статье освещается применение генетического алгоритма для оптимизации системы управления газотурбинными установками в составе программно-моделирующего комплекса «КМЭС». Генетический алгоритм – новейший, но не единственно возможный способ решения задач оптимизации. С давних пор известны два основных пути решения таких задач – переборный и локально-градиентный. У этих методов свои достоинства и недостатки, и в каждом конкретном случае следует подумать, какой из них выбрать. Типичная практическая задача, как правило, мультимодальна и многомерна, то есть содержит много параметров. Для таких задач не существует ни одного универсального метода, который позволял бы достаточно быстро найти абсолютно точное решение. Однако комбинируя переборный и градиентный методы, можно надеяться получить хотя бы приближенное решение, точность которого будет возрастать при увеличении времени расчета.

Ключевые слова: система управления, генетический алгоритм, хромосома, ген, популяция, кроссовер, мутация, функция приспособленности, отбор.

G.A. Kilin, B.V. Kavalеров, K.A. Odin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

**APPLICATION OF GENETIC ALGORITHM IN TUNING
AND OPTIMIZATION TASKS OF GAS-TURBINE UNITS
CONTROL SYSTEM**

In this article application of genetic algorithm for optimization of a control system by gas-turbine units as a part of the software modeling suite KMES is shined. Genetic algorithm – the latest, but not the unique way of the solution of optimization problems. For a long time two main solutions of such tasks – direct-search and local-gradient are known. At these methods the merits and demerits and in each case it is necessary to think what to choose from them. The typical practical task, as a rule, multimodal and multi-dimension, that is contains many parameters. For such tasks there is no universal method which would allow to find absolutely exact solution quickly enough. However, combining direct-searc and gradient methods, it is possible to hope to receive at least the approximate decision which accuracy will increase at increase in time of calculation.

Keywords: control system, genetic algorithm, chromosome, gen, population, crossover, mutation, fitness function, selection.

Введение. В наземных целях широко применяются конвертированные газотурбинные установки (ГТУ), которые строятся на базе авиационных газотурбинных двигателей. Один из главных резервов совершенствования характеристик наземных газотурбинных установок (ГТУ) заключается в более полном использовании возможностей систем автоматического управления (САУ) [1]. Для построения САУ ГТУ необходимы модели объекта управления и внешней среды.

Упрощенные модели ГТУ, как правило, формируются по данным экспериментов с помощью алгоритмов идентификации [2]. Главное преимущество таких моделей – высокое быстродействие, поэтому такие модели иногда называют быстрорешаемыми. Быстрорешаемые модели предназначены для использования в задачах диагностики, настройки и оптимизации систем управления ГТУ, в тренажерных комплексах, при стендовых испытаниях установок различного назначения: для электростанций, для газоперекачивающих агрегатов, для авиационного применения. Быстрорешаемые модели могут быть как линейными, так и нелинейными [3].

Рассмотрим возможность применения генетического алгоритма для настройки и оптимизации САУ ГТУ с помощью дальнейшего развития программного моделирующего комплекса (ПМК) «КМЭС» [4].

Краткое описание ПМК «КМЭС». Программно-моделирующий комплекс (ПМК) «КМЭС» разработан в Пермском национальном исследовательском политехническом университете по заданию ОАО «Авиадвигатель» [5]. ПМК «КМЭС» предназначен для моделирования, испытания и настройки цифровых регуляторов САУ электроэнергетическими ГТУ.

Интерфейс ПМК «КМЭС» представлен на рис. 1.

В ПМК «КМЭС» используется нелинейная модель ГТУ разработки ОАО «Авиадвигатель».

Устройства управления генератора и ГТУ являются подсистемами, определяющими качество производимой электроэнергии, прежде всего, по напряжению и частоте. Программы, осуществляющие моделирование регуляторов, выполняются в виде отдельных библиотек, которые содержат описание необходимых типов и функций для расчета координат регулятора за один шаг моделирования. В программном комплексе применен подход, построенный по базовым принципам автостроения, распространенный в SCADA-системах, что значительно облегчает задачу программирования.

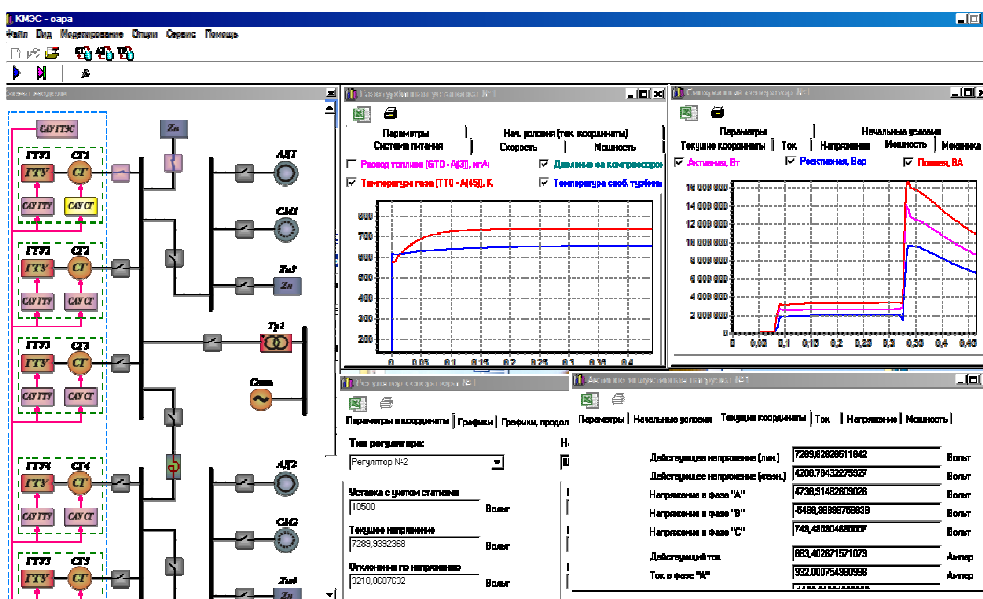


Рис. 1. Интерфейс ПМК «КМЭС»

В программе «Администратор шаблонов САУ» разработчику САУ достаточно ввести следующие исходные данные: наименование регулятора; перечень дополнительных параметров, их наименование, единицы измерения и начальные значения; начальные значения входных и выходных параметров.

В результате работы программы «Администратор шаблонов САУ» автоматически создаются файлы, представляющие собой шаблоны исходного кода библиотеки САУ для заданного регулятора (регулятор ГТУ, регулятор генератора, и др.)

Критерий автоматической настройки системы управления. В основном принято считать идеальным переходным процессом или ступенчатый (скачкообразный) переходной процесс, протекающий мгновенно и без перерегулирования, или процесс, представляемый экспонентой с заданными параметрами. В практике проектирования систем управления наибольшее применение находят линейные и квадратичные интегральные критерии качества [6].

Рассмотрим в качестве критерия оптимизации интегральный критерий вида

$$J = \int_0^{\infty} (e^2 + \tau^2 (e')^2) dt,$$

где e – отклонение регулируемого параметра от заданного значения, τ – постоянная, имеющая размерность времени [6].

Данный критерий минимизирует как отклонение регулируемого параметра, так и скорость изменения данного параметра, уменьшая колебательность. Таким образом, идеализированным переходным процессом в этом случае считается экспонента, к которой и должен стремиться реальный переходный процесс.

В простейшем варианте оптимизация реализуется по выходной координате – частоте вращения свободной турбины. Данная стратегия не всегда дает положительные результаты, поэтому, по крайней мере, необходимо брать еще входную координату – угол дозатора топлива. В противном случае входная переменная, а вместе с ней расход топлива и частота вращения турбокомпрессора могут иметь колебательный характер, несмотря на плавное изменение частоты вращения свободной турбины.

Учет нескольких переменных в общем критерии автоматической настройки САУ ГТУ может осуществляться посредством сложения критериев для каждой переменной в отдельности с весовыми коэффициентами [7].

Генетический алгоритм. Генетический алгоритм (ГА) – это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомым параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе.

Генетический алгоритм представляет собой комбинированный подход. Механизмы скрещивания и мутации в каком-то смысле реализуют переборную часть метода, а отбор лучших решений – градиентный спуск [8]. На рис. 2 показано, что такая комбинация позволяет обеспечить устойчиво хорошую эффективность генетического поиска для любых типов задач.

Если на некотором множестве задана сложная функция от нескольких переменных, то генетический алгоритм – это программа, которая за разумное время находит точку, где значение функции достаточно близко к максимально возможному. Выбирая приемлемое время расчета, мы получим одно из лучших решений, которые вообще возможно получить за это время [8].

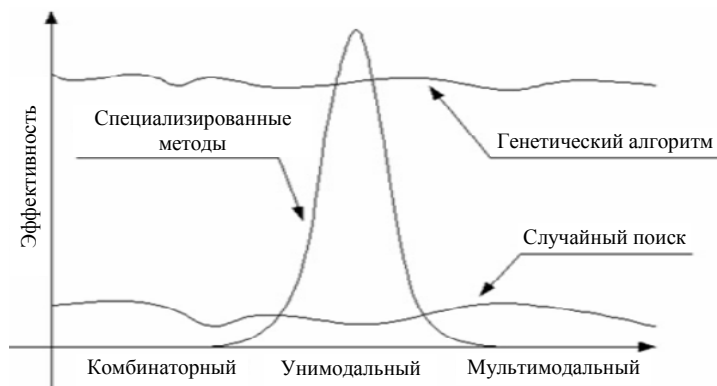


Рис. 2. Сравнение генетического алгоритма со стандартными алгоритмами

Именно по этим причинам генетический алгоритм был выбран для выполнения задач настройки и оптимизации. Преимущества генетического алгоритма (ГА) следующие:

- 1) ГА не требуют никакой информации о поведении функции (например, дифференцируемости и непрерывности);
- 2) разрывы, существующие на поверхности ответа, имеют незначительный эффект на полную эффективность оптимизации;
- 3) ГА относительно стойки к попаданию в локальные оптимумы;
- 4) ГА пригодны для решения крупномасштабных проблем оптимизации;
- 5) ГА могут быть использованы для широкого класса задач;
- 6) ГА просты в реализации;
- 7) ГА могут быть использованы в задачах с изменяющейся средой.

При реализации алгоритма были предприняты попытки по оптимизации ГА для более быстрого достижения необходимых результатов. В результате были сделаны следующие выводы:

- 1) замена на определенном этапе алгоритма «худших» особей на «лучших». Данная попытка не дала каких-либо существенных преимуществ, так как в ходе данной процедуры разнообразие популяции резко сокращалось, что приводило к довольно частым случаям нахождения локального, а не глобального минимума;
- 2) применение многоточечного кроссингвера и многоточечной мутации. Чаще всего данные изменения имели вероятностные улучшения, так как алгоритм выбора точки использовал генератор случайных чисел.

Порядок реализации генетического алгоритма. Задача формализуется таким образом, чтобы ее решение могло быть закодировано в виде вектора («генотипа») генов, где каждый ген может быть битом, числом или неким другим объектом. В классических реализациях ГА предполагается, что генотип имеет фиксированную длину. Однако существуют вариации ГА, свободные от этого ограничения.

Изначально, чаще всего случайным образом, создается множество генотипов начальной популяции. Они оцениваются с использованием «функции приспособленности», в результате чего с каждым генотипом ассоциируется определенное значение («приспособленность»), которое определяет, насколько фенотип, им описываемый, решает поставленную задачу.

Из полученного множества решений («поколения») с учетом значения «приспособленности» выбираются решения (обычно лучшие особи имеют большую вероятность быть выбранными), к которым применяются «генетические операторы»:

- 1) кроссовер;
- 2) мутация.

Результатом этого является получение новых решений. Для них также вычисляется значение приспособленности, и затем производится отбор («селекция») лучших решений в следующее поколение.

Этот набор действий повторяется итеративно, так моделируется «эволюционный процесс», продолжающийся несколько жизненных циклов (*поколений*), пока не будет выполнен критерий остановки алгоритма. Таким критерием может быть:

- нахождение глобального либо субоптимального решения;
- исчерпание числа поколений, отпущенных на эволюцию;
- исчерпание времени, отпущенного на эволюцию.

Генетические алгоритмы служат главным образом для поиска решений в многомерных пространствах поиска.

Таким образом, можно выделить следующие этапы генетического алгоритма (рис. 3):

1. Задать целевую функцию (приспособленности) для особей популяции.

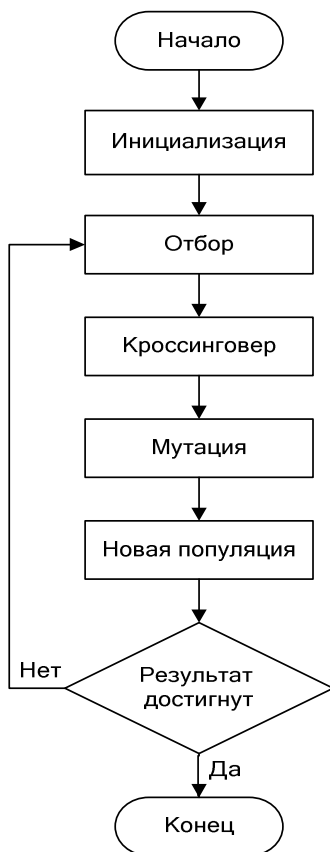


Рис. 3. Выполнение генетического алгоритма

2. Создать начальную популяцию (инициализация)

• (Начало цикла)

1) отбор,

2) размножение (кроссинговер),

3) мутация,

4) формирование нового поколения,

5) вычисление значения целевой функции для всех особей,

б) если выполняются условия останова, то конец цикла, иначе – начало цикла.

Для последующего использования в ПМК «КМЭС» [5] в соответствии с рис. 3 разработан алгоритм для настройки и оптимизации САУ ГТУ. При этом ПМК «КМЭС» позволяет выполнять моделирование внешних условий работы ГТУ: воспроизводить электроэнергетическую систему произвольной конфигурации. Кроме того,

изучались возможности получения моделей ГТУ в версиях для газоперекачки и микротурбины [9, 10, 11]. Модель ГТУ может использоваться в составе ПМК не только как сложная, поэлементная, но и как быстрорешаемая [3]. В последнем случае разработаны инструменты автоматического синтеза такой модели по экспериментальным данным. С помощью параметрической и структурной идентификации осуществляется построение моделей с одновременной проверкой адекватности. Вслед за этим на ПМК могут производиться настройка и оптимизация САУ ГТУ, для чего используются различные алгоритмы поиска экстремума [12].

Результаты. На рис. 4 представлен результат настройки модели САУ ГТУ.

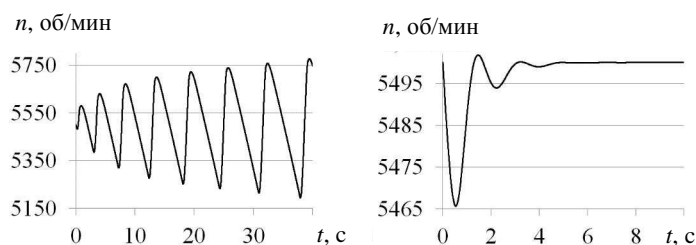


Рис. 4. Графики частоты вращения свободной турбины (n) до (a) и после (b) настройки

В качестве модели ГТУ используется быстрорешаемая модель газотурбинного двигателя Д30. Использовалась модель САУ ГТУ, реализованная в ПМК «КМЭС». Для имитации наброса нагрузки применяется быстрорешаемая модель электроэнергетической системы (синхронный генератор и активно-индуктивная нагрузка), реализованная в пространстве состояний.

На рис. 4, a изображен график частоты вращения свободной турбины до настройки, а на рис. 4, b – график данного параметра после настройки с помощью генетического алгоритма.

Выводы. Разработанный алгоритм пополнил алгоритмический инструментарий ПМК, подтверждена его работоспособность, получен приемлемый результат по качеству настройки. При этом ожидаемо увеличилось время настройки, исследования по совершенствованию алгоритма продолжаются.

Кроме того, поставлена задача исследовать применимость генетического алгоритма для другой цели. Речь идет о выборе структуры

быстрорешаемой модели на основе экспериментальных данных, т.е. о структурной идентификации. В настоящее время эта задача решается упрощенно: направленным перебором. Поэтому в одной из следующих статей планируется рассмотреть результаты работ по исследованию применимости генетического алгоритма для структурной идентификации модели ГТУ.

Библиографический список

1. Идентификация и диагностика в информационно-управляющих системах авиакосмической энергетики // Б.В. Боев, В.В. Бугровский, М.П. Вершинин [и др.]. – М.: Наука, 1988. – 168 с.
2. Кавалеров Б.В. Автоматизация испытаний САУ ГТУ газотурбинных мини-электростанций при проектировании и настройке // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 12–17.
3. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 82 с.
4. Автоматизация настройки регуляторов газотурбинных мини-электростанций при компьютерных испытаниях / А.И. Полулях, И.Г. Лисовин, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 6. – С. 14–17.
5. А.с. № 2011611839 РФ. Программный комплекс «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети» «КМЭС» / А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов, К.А. Один, А.И. Полулях, А.С. Ситников, И.Г. Лисовин, Е.Н. Ширинкина; дата регистрации 28.02.2011.
6. 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.
7. Васильев В.Г. Критерии качества систем автоматического управления. – Тверь: Изд-во Твер. гос. техн. ун-та, 2007. – 17 с.
8. Кавалеров Б.В., Один К.А., Даденков Д.А. Автоматическая настройка систем автоматического управления газотурбинными установками с использованием алгоритмов библиотеки Apache Commons Math // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 1. – URL: www.science-education.ru/115-12039 (дата обращения: 12.03.2014).

9. Генетические алгоритмы [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.neuroproject.ru/genealg.php> (дата обращения: 10.04.2014).

10. Идентификация газоперекачивающего агрегата для модельного испытания и настройки системы управления / Г.А. Килин, Б.В. Кавалеров, И.В. Бахирев, А.Ю. Поварницын // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер: Системный анализ и информационные технологии. – 2014. – № 1. – С. 65–71.

11. Алгоритм построения быстрорешаемой модели газотурбинной газоперекачивающей установки по экспериментальным данным / Б.В. Кавалеров, К.А. Один, Г.А. Килин, И.В. Бахирев, А.Ю. Поварницын // Вестник Ижевск. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 3. – С. 116–118.

12. Кавалеров Б.В., Килин Г.А., Один К.А. Автоматизированное формирование упрощенных моделей ГТУ для многофункциональных тренажерных комплексов // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: материалы VII Всерос. (с междунар. участ.) науч.-техн. интернет-конф.; 1–30 ноября 2013 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – С. 89–97.

13. Ярмонова О.А., Один К.А., Кавалеров Б.В. Автоматизация испытаний систем управления электроэнергетическими газотурбинными установками // Электроэнергетика глазами молодежи: Научные труды III Междунар. науч.-техн. конф.; 22–26 окт. 2012 г. – Пермь, 2012. – Т. 2. – С. 317–320.

References

1. Boev B.V., Bugrovskii V.V., Vershinin M.P. [et al]. Identifikatsiia i diagnostika v informatsionno-upravliaiu-shchikh sistemakh aviakosmicheskoi energetiki [Identification and diagnostics in management information systems of aerospace power engineering] Moscow: Nauka, 1988. 168 p.

2. KavaleroV B.V. Avtomatizatsiia ispytaniy SAU GTU gazoturbinnnykh mini-elektrostantsii pri proektirovanii i nastroiike [Automation of tests of systems of automated management of gas-turbine installations of gas-turbine mini-power stations in case of design and setup] *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2011, no. 1, pp. 12-17.

3. Gol'berg F.D., Batenin A.V. Matematicheskie modeli gazoturbinnnykh dvigatelei kak ob"ektov upravleniia [Mathematical models of turbine jets as control objects]. *Moskovskii aviatsionnyi institut*, 1999. 82 p.

4. Poluliakh A.I., Lisovin I.G., Kavalero B.V., Shigapov A.A. Avtomatizatsiia nastroiки regulatorov gazoturbinnnykh mini-elektrostantsii pri komp'yuternykh ispytaniyakh [Automation of setup of regulators of gas-turbine mini-power stations in case of computer tests]. *Avtomatizatsiia v promyshlennosti*, 2011, no. 6, pp.14-17.

5. Petrochenkov A.B., Kavalero B.V., Shigapov A.A., Odin K.A., Poluliakh A.I., Sitnikov A.S., Lisovin I.G., Shirinkina E.N. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM № 2011611839 RF. Programmnyi kompleks «Kompleks matematicheskikh modelei elektrogeneratora i elektroseti» [Certificate on the state registration of the computer program No. 2011611839 of the Russian Federation. Program complex "Complex of Mathematical Models of the Electric Generator and Power Supply Network"]. 28.02.2011.

6. Poluliakh A.I., Lisovin I.G., Kavalero B.V., Shigapov A.A. Issledovanie vzaimovliianiia sistem upravleniia gazoturbinnnoi ustanovki i elektrogeneratorom pri avtomatizirovannoi nastroiке regulatorov [Research of interference of management systems gas-turbine installation and the electric generator in case of automated setup of regulators]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011, vol. 7, no. 11.1, pp.129-132.

7. Vasil'ev V.G. Kriterii kachestva sistem avtomaticheskogo upravleniia [Criteria of quality of systems of automatic control]. Tverskoi gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2007. 17 p.

8. Kavalero B.V., Odin K.A., Dadenkov D.A. Avtomaticheskaiя nastroiка sistem avtomaticheskogo upravleniia gazoturbinnnyimi ustanovkami s ispol'zovaniem algoritmov biblioteki Apache Commons Math [Automatic adjustment of systems of automatic control of gas-turbine installations with use of algorithms of Apache Commons Math library]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2014, no. 1, available at: www.science-education.ru/115-12039 (accessed 12 March 2014).

9. Geneticheskie algoritmy [Genetic algorithms], available at: <http://www.neuroproject.ru/genealg.php> (accessed 10 April 2014)

10. Kilin G.A., Kavalero B.V., Bakhirev I.V., Povarnitsyn A.Iu. Identifikatsiia gazoperekachivaiushchego agregata dlia mo-del'nogo ispytaniia i nastroiки системы upravleniia [Identification of the gas-distributing aggregate for dummy test and setup of management system].

Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Sistemnyi analiz i informatsionnye tekhnologii., 2014, no. 1, pp. 65-71.

11. Kavalеров B.V., Odin K.A., Kilin G.A., Bakhirev I.V., Povarnitsyn A.Iu. Algoritm postroeniia bystroreshaemoi modeli gazoturbinoi gazoperekachivaiushchei ustanovki po eksperimental'nym dannym [Algorithm of creation of the fast-solved model of gas-turbine gas-distributing installation on the experimental data]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta*, 2013, no. 3, pp. 116-118.

12. Kavalеров B.V., Kilin G.A., Odin K.A. Avtomatizirovannoe formirovanie uproshhennykh modelej GTU dlja mnogofunkcional'nykh trenazhnykh kompleksov [Automated formation of reduced models of gas-turbine units for multifunction training complexes]. *Energetika. Innovatsionnye napravleniia v energetike. CALS-tekhnologii v energetike: materialy VII Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi internet-konferentsii (1-30 November 2013)*, Permskii natsional'nyi issledovatel'skii politekhnicheskii universitet, 2013. pp. 89-97.

13. Iarmonova O.A., Odin K.A., Kavalеров B.V. Avtomatizatsiia ispytaniia sistem upravleniia elektroenergeticheskimi gazoturbinyimi ustanovkami [Automation of tests of management systems electrical power gas-turbine installations]. *Nauchnye trudy III Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektroenergetika glazami molodezhi"*, 22–26 oktober 2012. Perm', 2012, vol. 2, pp. 317-320.

Сведения об авторах

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).

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).

Один Константин Анатольевич (Пермь, Россия) – ассистент кафедры микропроцессорных средств автоматизации Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: oka54@mail.ru).

About the authors

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

Kavalerov 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, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: kbv@pstu.ru).

Odin Konstantin Anatolievich (Perm, Russian Federation) is an Assistant of the Department of Automation Microprocessors Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: oka54@mail.ru).

Получено 10.06.2014