

УДК 621.45.018.2

**А.С. Плешивых<sup>1,2</sup>, А.А. Заборских<sup>2</sup>, А.И. Фатыков<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия

<sup>2</sup>АО «ОДК-Авиадвигатель», Пермь, Россия

## **СТЕНД ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ЧАСТИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

При создании современных газотурбинных двигателей отмечается значительное усложнение систем автоматического управления и контроля, а их проверка является сложной по множеству причин.

Для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР) систем управления требуется наличие объекта управления – газотурбинного двигателя. Создание демонстрационных систем автоматического управления (САУ) и газотурбинных двигателей (ГТД), их совместное испытание и доводка – это долгие и затратные процессы, которые несут большие риски. Чем больше времени занимает проект и выше риски, тем дороже он становится.

Для уменьшения рисков и времени, повышения качества научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ при разработке новых проектов систем автоматического управления и проверке существующих предлагается заменить реальный объект управления на его имитатор с его математической моделью.

Предварительная проверка электронных агрегатов систем автоматического управления и САУ на стенде посредством полунатурных испытаний позволяют: исключить множество ошибок в программном и алгоритмическом видах еще до изготовления блока контроллера управления и демонстрационного ГТД, исследовать разрабатываемые алгоритмы САУ и контроля (САУ и К) на начальных этапах жизненного цикла, проводить доводку интерфейсов взаимодействия между элементами САУ и К, производить оценку выполнения требований технических заданий на электронные агрегаты САУ и К до начала проведения испытаний на двигателе с возможностью их своевременной коррекции, и проводить исследования возможных причин нештатных ситуаций электронных агрегатов САУ и К во время эксплуатации.

В работе описаны полунатурные испытания электронной части САУ на примере турбореактивного двухконтурного двигателя.

**Ключевые слова:** безмоторный стенд, система автоматического управления, математическая модель, качество, газотурбинный двигатель, полунатурные испытания.

A.S. Pleshivich<sup>1,2</sup>, A.A. Zaborskikh<sup>2</sup>, A.I. Fatykov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

<sup>2</sup>JCS «UEC-Aviadvigatel», Perm, Russian Federation

## TEST BENCH FOR TESTING ELECTRONICS OF GAS TURBINE ENGINE AUTOMATIC CONTROL SYSTEM

Considerable sophistication of automatic monitoring and control systems in the gas turbine engine development can be seen today, and their verification is complex for a number of reasons.

Control systems R&D require a control object that is a gas turbine engine. Processes of demonstration automatic control systems and GT engines design, their joint testing and engineering development are time and money consuming activities associated with great risks. The more time a project takes and higher the risks are, the more expensive it becomes.

In order to reduce that risks and time, improve the R&D quality when developing new ACS projects and checking current ones, the real control object could be replaced with its simulator and its mathematical model.

The bench pre-check of ACS electronic assemblies and Automatic Control Systems using HIL simulations allows to: avoid a lot of errors by software and algorithms prior to production of the controller unit and GT engine demonstrator; analyze the ACS & C algorithms being developed at the initial stages of the life cycle; refine the interaction interfaces between the ACS & C elements; estimate a compliance with the technical specifications for the ACS & C electronic units before the beginning of the engine tests making it possible to introduce early corrections; and study potential causes of abnormal incidents in the ACS & C electronic units during operation.

The paper describes the iron bird tests of automated control system electronic section based on the example of bypass flow engine.

**Keywords:** unpowered stand, automatic control system, mathematical model, quality, gas turbine engine, HardWare-In-the-Loop simulation (HIL).

Газотурбинные двигатели имеют в своем составе следующие узлы: компрессор низкого и высокого давления, вентилятор, камеру сгорания, турбины низкого и высокого давления, сопло (рис. 1).

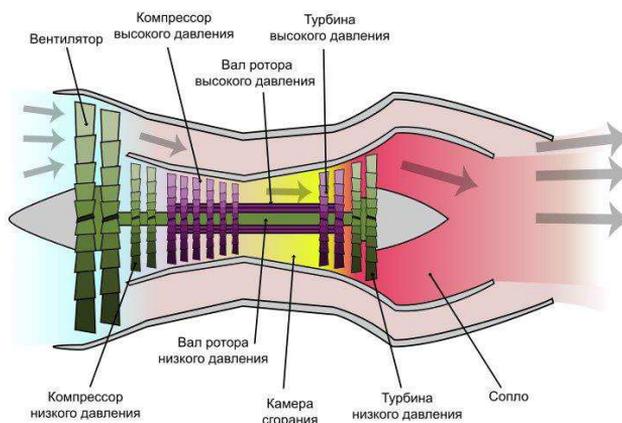


Рис. 1. Схема двухконтурного турбореактивного газотурбинного двигателя

Одной из содержательных задач всегда являлся процесс обеспечения стабильности параметров работы двигателя. Особую сложность представляют режимы запуска и переходные режимы работы двигателя с учетом внешних условий (влияние атмосферных условий и режимов полета летательного аппарата). В связи с этим для регулирования и контроля двигателя применяются системы автоматического управления и контроля (САУ и К) ГТД.

САУ и К (далее по тексту – САУ) – это «мозг» двигателя, она принимает важнейшие решения в управлении и следит за правильной работой двигателя.

Система автоматического управления включает в себя: регулятор электронного двигателя (РЭД), блоки мониторинга, датчики и исполнительные механизмы, системы электропитания и коммутации, блок насосов.

Регулятор электронного двигателя представляет собой специализированный многопроцессорный электронный вычислительный комплекс, работающий в реальном масштабе времени, который предназначен для выработки управляющих воздействий на исполнительные механизмы САУ и агрегаты двигателя на всех режимах работы двигателя, обработки входных управляющих сигналов и сигналов с датчиков. Кроме того, РЭД обеспечивает информационный обмен с системами двигателя и самолета.

Основными задачами САУ являются: обеспечение подачи необходимого количества топлива в камеру сгорания, управление геометрией компрессоров, охлаждение лопаток, комплексное управление, контроль и диагностика на всех режимах работы двигателя (в том числе и на остановленном двигателе) и многое другое в соответствии с заданными программами, а также взаимодействие с системами двигателя, маршевой силовой установки и самолета [1].

В связи с этим для исключения программных и аппаратных ошибок САУ для проверки ее работоспособности в любых условиях и в любой ситуации, в том числе и нештатной, необходимо создание базы для проведения таких исследований.

Основной объем экспериментальных исследований выполняется до установки САУ на двигатель. Эти исследования находятся среди важнейших этапов разработки САУ, подтверждающих правильность решений для получения требуемых характеристик систем в ожидаемых условиях эксплуатации [6].

На основании вышеизложенного появляется потребность в создании специального стенда, позволяющего проводить экспериментальные исследования САУ (стенд для испытаний электронной части управления ГТД) [11].

Проведение экспериментальных исследований на таком стенде дает возможность подтвердить работоспособность системы, сократить объем и сроки дорогостоящих испытаний двигателя, снизить риски, трудозатраты и стоимость испытаний в целом\*.

Данный специализированный стенд позволяет смоделировать объект (двигатель), его работу и параметры. Это осуществляется при помощи программно-аппаратного моделирования (HardWare-In-the-Loop). Главная особенность метода заключается в том, что объект управления заменяется программно-аппаратным имитатором с математической моделью [12, 13, 14].

Специальный стенд для полунатурных испытаний в своем составе должен иметь:

- программно-аппаратный имитатор объекта (имитатор двигателя);
- систему автоматического управления и контроля;
- стендовую систему управления и мониторинга (пульт оператора).

Структурная схема данного стенда представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема стенда для полунатурных испытаний систем автоматического управления и контроля

\*ГОСТ РВ 15.203-2001. Система разработки и постановки продукции на производство. Военная техника. Порядок выполнения опытно-конструкторских работ по созданию изделий и их составных частей. – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 130 с.

Пульт оператора представляет собой систему, позволяющую осуществлять выдачу управляющих сигналов в САУ от оператора, мониторинг и регистрацию параметров двигателя (см. рис. 2).

В качестве программно-аппаратного имитатора двигателя выступает промышленный контроллер, в который должно быть интегрировано программное изделие «Математическая модель двигателя».

Математическая модель двигателя представляет собой модель состояний, которая, в свою очередь, состоит из трех математических моделей, описывающих основные состояния двигателя:

- «Работа двигателя на этапе запуска»;
- «Работа двигателя на основных режимах»;
- «Двигатель в выключенном состоянии».

Каждая из вышеперечисленных математических моделей представляется группой уравнений, отражающих физические процессы, протекающие в двигателе. Основная цель такой математической модели двигателя – «заменить» реальный двигатель и выдать в САУ основные параметры, такие как частоты вращения роторов низкого и высокого давлений, температура газа за турбиной, давление за компрессором в зависимости от окружающих условий, и др.

Первый процесс – это запуск двигателя, его отличительная особенность в том, что работа узлов и элементов двигателя идет на нерасчетных режимах, и на пусковые свойства двигателя влияют большие группы факторов, такие как климатические условия, программы подачи топлива, регулирование геометрии проточной части двигателя, характер подведения мощности к валу двигателя от пускового устройства и др. [1].

Процесс запуска можно описать в три этапа:

- раскрутка ротора двигателя стартером до определенной частоты вращения, при которой в камере сгорания может сформироваться устойчивый факел горения топлива;

- подача в камеру сгорания рабочей жидкости (керосина) с одновременной подачей электрического напряжения на свечи зажигания, после чего происходит воспламенение топлива, и дальнейшая раскрутка производится совместно стартером и турбиной ротора двигателя;

- отключение стартера при определенной частоте вращения ротора двигателя. Дальнейшая раскрутка до режима малого газа производится только турбиной ротора двигателя.

После запуска двигателя идет его основной режим работы, который длится большую часть времени работы двигателя. Для одного и того же типа газотурбинного двигателя можно построить различные математические модели, но условно они могут быть подразделены на линейные и нелинейные [1].

Полная нелинейная математическая модель двигателя строится по точному описанию процессов в основных узлах и агрегатах двигателя. Она позволяет решать большой круг задач, таких как расчет параметров на установившихся режимах работы; воспроизведение переходных процессов приемистости при действии внешних и внутренних возмущений; прогнозирование характеристик двигателя в нештатных ситуациях и т.д. Такая модель обеспечивает высокую точность (не более 2–4 %) за счет учета вторичных факторов: изменение теплофизических свойств газа на различных режимах; отборы воздуха на охлаждение; зависимость КПД узлов двигателя от режима работы; механические потери мощности; зависимость характеристик агрегатов и т.д.

Для обеспечения расчета основных параметров двигателя в качестве математической модели для основных режимов принята линеаризованная математическая модель с вычислением первых производных по частотам вращения роторов двигателя с учетом коэффициентов влияния по топливу, отборам воздуха, перепускам воздуха из-за подпорных ступеней КНД и положению ВНА компрессора. Реализация простых алгоритмов расчета динамики двигателя позволяет обеспечить требуемые надежность, оперативность и простоту эксплуатации модели при неточности в описании характеристик двигателя по сравнению с полной нелинейной математической моделью. Статические характеристики и динамические коэффициенты влияния на различных режимах в основном диапазоне работы двигателя получают с помощью серии расчетов, проведенных по полной нелинейной математической модели двигателя.

Структура линейной непрерывной математической модели определена следующей системой уравнений, которая строится на основе математической статистики и корреляционного анализа [2, 3, 4, 5, 8, 15]:

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = F_0 + \mathbf{F}x(t) + \mathbf{C}u(t) + w(t), \\ Y(t) = H_0 + \mathbf{H}x(t) + \mathbf{D}u(t) + v(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $\mathbf{F}$  – матрица состояния или динамическая матрица;  $\mathbf{C}$  – матрица управления;  $\mathbf{H}$  – матрица измерения;  $\mathbf{D}$  – матрица управления статиче-

ской моделью;  $F_0$  – вектор постоянного смещения;  $H_0$  – вектор постоянного смещения статической модели;  $Y$  – вектор измерения;  $x(t)$  – вектор состояния;  $u(t)$  – вектор управления;  $w(t)$  – вектор возмущения;  $v(t)$  – вектор возмущения.

Рассмотренные в случае (1) способы были применены для линейной модели ГТД. Уравнение движения для ГТД имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{n}_{нд} = f_{01} + f_{11}n_{нд} + f_{12}n_{вд} + c_{11}G_T + c_{12}G_{вотб} + c_{13}\Phi_{вна} + w_1, \\ \dot{n}_{вд} = f_{02} + f_{21}n_{нд} + f_{22}n_{вд} + c_{21}G_T + c_{22}G_{вотб} + c_{23}\Phi_{вна} + w_2, \\ \begin{cases} P_k = h_{01} + h_{11}n_{нд} + h_{12}n_{вд} + d_{11}G_T + d_{12}G_{вотб} + d_{13}\Phi_{вна} + v_1, \\ T_T = h_{02} + h_{21}n_{нд} + h_{22}n_{вд} + d_{21}G_T + d_{22}G_{вотб} + d_{23}\Phi_{вна} + v_2, \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

где  $n_{нд}$  – частота вращения ротора низкого давления,  $n_{вд}$  – частота вращения ротора высокого давления;  $P_k$  – давление за компрессором высокого давления;  $T_T$  – температура за турбиной низкого давления;  $G_T$  – расход топлива;  $G_{вотб}$  – расход по перепуску воздуха из-за подпорных ступеней компрессора низкого давления;  $\Phi_{вна}$  – отклонение по положению ВНА компрессора;  $w_i$  – шум системы, возмущения;  $v_i$  – шум измерения.

В модель 2 также можно включить и множество других параметров, таких как положение рычага управления двигателя, положение дозирующей иглы, температуры лопаток, параметры воздуха на входе в двигатель и другие, но они не включаются в систему, так как не влияют на управление или напрямую связаны с основными параметрами.

При выключении двигателя с любого режима его работы наступает процесс самопроизвольного торможения (свободный выбег), т.е. торможения исключительно за счет внутренних сил трения в подшипниках и сопротивления о воздух вращающихся частей двигателя [1].

При работе реального двигателя его параметры передаются в виде электрических сигналов с датчиков в САУ, и в ответ САУ выдает электрические сигналы на исполнительные механизмы двигателя (рис. 3) по протоколу ARINC 429 [1, 11, 12].

Для обеспечения проведения исследований САУ на специальном стенде необходимо создание имитаторов датчиков и имитаторов исполнительных механизмов, которые будут передавать параметры двигателя в САУ в виде электрических сигналов, и принимать электрические сигналы от САУ соответственно.

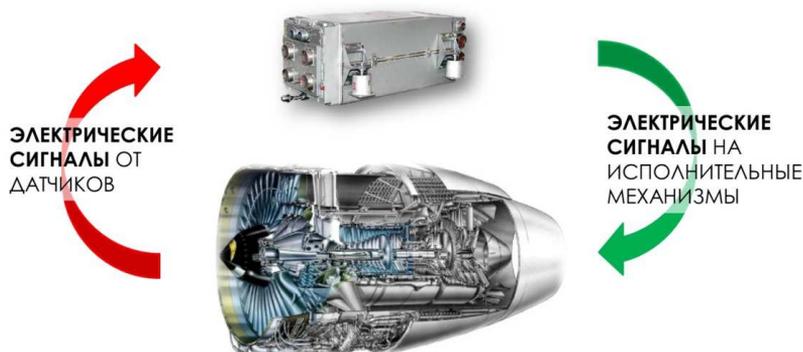


Рис. 3. Схема взаимодействия САУ и двигателя

Разработка имитаторов датчиков и имитаторов исполнительных механизмов – одна из нетривиальных задач, которая требует полной идентификации работы имитаторов с реальными датчиками и исполнительными механизмами.

На специальном стенде исследования выполняются в режиме реального времени. Данную работу можно представить в виде следующей последовательности:

1. С пульта оператора формируются входные условия в двигатель, задается управляющее воздействие для запуска двигателя.

2. Сигналы с пульта оператора поступают в САУ, где обрабатываются и в качестве управляющих воздействий передаются в имитаторы исполнительных механизмов в виде электрических сигналов.

3. Электрические сигналы с имитаторов датчиков поступают в САУ и мгновенно обрабатываются. После чего по «введенным» в САУ алгоритмам формируются управляющие электрические сигналы на исполнительные механизмы двигателя, которые поступают в имитаторы исполнительных механизмов.

4. Имитаторы исполнительных механизмов расшифровывают поступившие электрические сигналы в информационные, которые затем передают в имитатор двигателя.

5. Программно-аппаратный имитатор двигателя в соответствии с заданными условиями проводит математический расчет, и получаемые на выходе параметры двигателя (информационные сигналы) передаются в имитаторы датчиков, где в свою очередь формируются соответствующие датчикам электрические сигналы.

Представленная последовательность выполняется циклично (рис. 4), пока с пульта управления не придет управляющий сигнал на останов испытаний. Все результаты отображаются и архивируются в системе мониторинга.

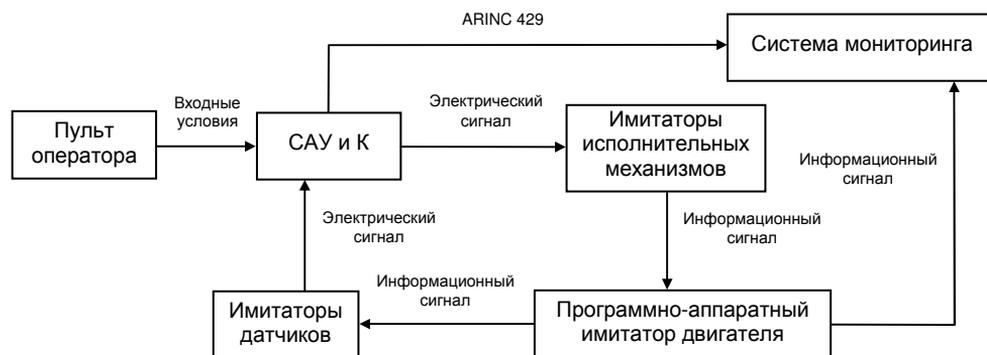


Рис. 4. Функциональная схема последовательности работы стенда

Данный функционал требует больших ресурсов вычислительной техники и специализированного программного обеспечения. Соответствующим требованиям по аппаратной и программной части могут соответствовать такие фирмы, как NationalInstruments (США), SpeedGoat (Швейцария) и др.

**Выводы.** Стенд для испытаний электронной части САУ ГТД позволяет определять правильность и качество работы САУ и К, характеристики систем и агрегатов на установившихся и переходных режимах работы, проводить анализ располагаемых запасов устойчивости регулирования, выполнять отработку взаимодействия отдельных контуров и агрегатов, исследовать влияние возмущений и внешних факторов, проверять работоспособность САУ при отказах, снижает риски и время дорогостоящих испытаний.

### Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 1: Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы: учебник. – М.: Машиностроение, 2008. – 208 с.

2. Шевяков А.А. Автоматика авиационных и ракетных силовых установок. – М.: Машиностроение, 1965. – 552 с.
3. Шевяков А.А. Автоматическое регулирование двигателей летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 331 с.
4. Химмельблау Д. Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1973. – 958 с.
5. Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984. – 541 с.
6. Солохин, Э.Л. Испытания авиационных воздушно-реактивных двигателей: учебник для вузов по специальности «Авиационные двигатели». – М.: Машиностроение, 1975. – 356 с.
7. Добрянский, Г.В., Мартъянова Т.С. Динамика авиационных газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
8. Идентификация систем управления авиационных газотурбинных двигателей / В.Г. Августинovich, В.А. Акиндинов, Б.В. Боев, В.Т. Дедеш. – М.: Машиностроение, 1984. – 196 с.
9. Луценко В.А. Кучев С.М., Никишин В.Н. Безмоторный стенд для проведения испытаний турбокомпрессоров автомобильных дизелей // Известия Волгоград. гос. техн. ун-та. – 2013. – № 12. – С. 49–51.
10. Буряченко А.Г., Ранченко Г.С. Испытательная база и методическое обеспечение испытаний ответственных изделий авиационной техники // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 4. – С. 75–78.
11. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями / ред. О.С. Гуревич. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 264 с.
12. Системы автоматического управления авиационными газотурбинными двигателями: Энциклопедический справочник / ред. О.С. Гуревич. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2011. – 208 с.
13. Шевчук В.П. Моделирование метрологических характеристик интеллектуальных измерительных приборов и систем. – М.: Физматлит, 2011. – 320 с.
14. Шенон Р. Имитационное моделирование систем. – М.: Мир, 1978. – 420 с.
15. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления. – М.: Мир, 1975. – 68 с.

## References

1. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskii V.L. Osnovy konstruirovaniia aviatsionnykh dvigatelei i energeticheskikh ustanovok. Tom 1. Obshchie svedeniia. Osnovnye parametry i trebovaniia. Konstruktivnye i silovye skhemy [Bases of designing of aviation engines and power stations. Volume 1. General information. Key parameters and requirements. Constructive and power schemes]. Moscow: Mashinostroenie, 2008. 208 p.
2. Sheviakov A.A. Avtomatika aviatsionnykh i raketnykh silovykh ustanovok [Automatic equipment of aviation and rocket power plants]. Moscow: Mashinostroenie, 1965. 552 p.
3. Sheviakov A.A. Avtomaticheskoe regulirovanie dvigatelei letatel'nykh apparatov [Automatic control of engines of aircraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 331 p.
4. Khimmel'blau D. Analiz protsessov statisticheskimi metodami [Analysis of processes by statistical methods]. Moscow: Mir, 1973. 958 p.
5. Izerman R. Tsifrovye sistemy upravleniia [Digital control systems]. Moscow: Mir, 1984. 541 p.
6. Solokhin, E.L. Ispytaniia aviatsionnykh vozdushno-reaktivnykh dvigatelei: uchebnik dlia vuzov po spetsial'nosti "Aviatsionnye dvigateli" [Tests of aviation propulsion jet engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. 356 p.
7. Dobrianskii, G.V., Mart'ianova T.S. Dinamika aviatsionnykh gazoturbinykh dvigatelei [Dynamics of aviation gas-turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1989. 240 p.
8. Avgustinovich V.G., Akindinov V.A., Boev B.V., Dedesh V.T. Identifikatsiia sistem upravleniia aviatsionnykh gazoturbinykh dvigatelei [Identification of control systems of aviation gas-turbine engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 196 p.
9. Lushchenko V.A. Kuchev S.M., Nikishin V.N. Bezmotorni stend dlia provedeniia ispytaniia turbokompressorov avtomobil'nykh dizelei [The motorless stand for carrying out tests of turbocompressors of automobile diesels]. *Izvestiia Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2013, no. 12, pp. 49-51.
10. Buriachenko A.G., Ranchenko G.S. Ispytatel'naia baza i metodicheskoe obespechenie ispytaniia otvetstvennykh izdelii aviatsionnoi tekhniki [Testing facilities and methodical ensuring tests of responsible

products of the aircraft equipment]. *Aviatsionno-kosmicheskaja tekhnika i tekhnologija*, 2008, no. 4, pp. 75-78.

11. Sistemy avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigateliami [Automatic control systems for aviation gas turbine engines]. Ed. O.S. Gurevich. Moscow: TORUS PRESS, 2010. 264 p.

12. Sistemy avtomaticheskogo upravleniia aviatsionnymi gazoturbinnymi dvigateliami: Entsiklopedicheskii spravochnik [Systems of automatic control of aviation gas-turbine engines: Encyclopedic reference book]. Ed. O.S. Gurevich. Moscow: TORUS PRESS, 2011. 208 p.

13. Shevchuk, V.P. Modelirovanie metrologicheskikh kharakteristik intellektual'nykh izmeritel'nykh priborov i sistem [Modeling of metrological characteristics of intelligent measuring instruments and systems]. Moscow: Fizmatlit, 2011. 320 p.

14. Shenon R. Imitatsionnoe modelirovanie sistem [Imitating modeling of systems]. Moscow: Mir, 1978. 420 p.

15. Eikkhoff P. Osnovy identifikatsii sistem upravleniia [Bases of identification of control systems]. Moscow: Mir, 1975. 68 p.

### **Сведения об авторах**

**Плешивых Артур Сергеевич** (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., д. 29, e-mail: arthur.p.s.1995@mail.ru), стажер отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: pleshivich-as@avid.ru).

**Заборских Анна Александровна** (Пермь, Россия) – инженер-конструктор-расчетчик отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: zaborskikh@avid.ru).

**Фатыков Альмир Илгизович** (Пермь, Россия) – аспирант кафедры авиационных двигателей Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29), инженер отдела расчетно-экспериментальных работ и проектирования систем автоматического управления АО «ОДК-Авиадвигатель» (614990, Пермь, Комсомольский пр., 93, e-mail: fatykov-ai@avid.ru).

### **About the authors**

**Pleshivykh Arthur Sergeevich** (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: arthur.p.s.1995@mail.ru), Trainee Engineer, Automatic Control System Design Department, JSC “UEC-Aviadvigatel” (614990, Perm, 93, Komsomolsky pr., e-mail: plesivich-as@avid.ru).

**Zaborskikh Anna Alexandrovna** (Perm, Russian Federation) is an Engineer, Automatic Control System Design Department, JSC «UEC-Aviadvigatel» (614990, Perm, 93, Komsomolsky pr., e-mail: zaborskikh@avid.ru).

**Fatykov Almir Ilgizovich** (Perm, Russian Federation) is a Graduate Student Department of Aircraft Engines Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr.), Engineer Automatic Control System Design Department JSC “UEC-Aviadvigatel” (614990, Perm, 93, Komsomolsky pr., e-mail: fatykov-ai@avid.ru).

Получено 28.04.2017