

УДК 621.311.238:681.513.66

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ И СИГНАЛЬНОЙ НАСТРОЙКОЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В., Бахирев И.В.

*ГОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Пермь, e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru*

В статье исследуются возможности построения систем автоматического управления электроэнергетическими газотурбинными установками с использованием эталонной модели. Рассматривается применение сигнальной настройки, так как она обладает одним неоспоримым достоинством – наибольшей скоростью адаптивных процессов, в отличие от алгоритмов параметрической настройки. Кроме того, в этой модели ГТУ в первую очередь проявляются нелинейные свойства. В качестве метода адаптации целесообразно выбрать метод функций Ляпунова из соображений сокращения времени поиска экстремума. Для синтеза алгоритмов управления и испытания САУ ГТУ применяют упрощенные модели ГТУ, которые получают методом идентификации. Обсуждаются результаты компьютерных экспериментов и сделаны выводы о том, что, несмотря на простоту сигнальной настройки, нужно учитывать диапазон изменения параметров и физические ограничения данной модели.

Ключевые слова: эталонная модель, система автоматического управления, газотурбинная установка, моделирование

THE ELECTRIC ENERGY GAS TURBINE POWER WITH A REFERENCE MODEL AND A SIGNAL SETTING IS INVESTIGATION CONTROL SYSTEM

Ziyatdinov I.R., KavaleroV B.V., Bakhirev I.V.

GOU VPO «Perm National Research Polytechnic University», Perm, e-mail: i.ziyatdinoff@mail.ru

The possibility electric energy power gas turbine automatic control constructing systems is article investigates. The signal settings is application, because it has one indisputable advantage – the highest rate of adaptive processes, in contrast to the algorithms of parametric settings. Furthermore, nonlinear properties manifested in this model GTU primarily. It is expedient to choose the method of Lyapunov functions for reasons of reducing the search time of extreme as a method of adaptation. It is apply simplified models of gas turbines for the synthesis of control algorithms and testing of ACS GTU, which are obtained by identification. The results of computer experiments and draw conclusions that, despite the simplicity of the signal settings, you need to take into account the range of parameters and the physical limitations of the model. Computer experiments were discuss the results.

Keywords: reference model, automatic control system, power gas turbine, modelin

Предприятия отечественного авиационного двигателестроения выпускают газотурбинные установки (ГТУ) не только для авиации. ГТУ сегодня широко применяются при построении электростанций различной мощности. Хорошо известно, что ГТУ является работоспособной лишь при наличии системы автоматического управления (САУ) [3, 4]. Поэтому задачам совершенствования САУ ГТУ уделяется серьезное внимание [4]. В ГТУ, предназначенных для электростанций, возникает необходимость обеспечения заданных показателей качества электроэнергии в условиях постоянно изменяющейся электрической нагрузки и изменения режимов работы электростанции, что увеличивает требования к САУ [7]. Рассмотрим возможности использования адаптивного управления ГТУ с эталонной моделью и сигнальной настройкой для улучшения управления электроэнергетическими ГТУ. В качестве базы для построения таких систем возьмем методологический

аппарат из работы [1], где с системных позиций рассматривается научно-техническая проблема создания адаптивных алгоритмов управления для нелинейных электромеханических объектов с нелинейными свойствами. Так как в плане математического описания модель двухвальной ГТУ и модель обобщенного электромеханического преобразователя подобны, имеются основания использовать положения работы [1] по отношению к новому объекту – ГТУ. Опубликованные в статье результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки РФ № 13.832.2014/К «Разработка методологических основ адаптивного управления автономными и неавтономными газотурбинными электростанциями мощностью до 25 МВт».

Построение адаптивной системы

В работе [1] исследуются электромеханические объекты, где кратность изменения параметров составляет 5–10. Рассмотренные в [1]

алгоритмы адаптации нацелены на проведение подстройки системы управления за краткое время, что важно и при управлении электроэнергетическими ГТУ. Поэтому далее, опираясь на теоретическую базу работы [1], заменим объект управления и рассмотрим полученные результаты.

Движение ГТУ с учетом неустойчивости свойств запишем в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{f}, \dots); \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ – n -мерная функция состояния системы; $\mathbf{u} = \mathbf{u}(t)$ – m -мерная функция управляющих воздействий; $\boldsymbol{\xi}$ – вектор ограниченной размерности меняющихся параметров; $\mathbf{f} = \mathbf{f}(t)$ – n -мерная функция внешних возмущений; \mathbf{x}_0 – начальное состояние.

Перейдем к описанию нелинейной нестационарной модели ГТУ в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}, t)\mathbf{x} + \mathbf{B}(\mathbf{x}, t)\mathbf{u} + \mathbf{f}(t), \quad (2)$$

где $\mathbf{A}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{A}(\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}, t))$; $\mathbf{B}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{B}(\boldsymbol{\xi}(\mathbf{x}, t))$ – функциональные матрицы соответствующих размеров. Здесь предполагается управляемость пары (A, B).

Выделим в правой части (2) линейную стационарную часть

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_0\mathbf{x} + \mathbf{B}_0\mathbf{u} + \boldsymbol{\sigma}_\varphi; \quad \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad (3)$$

где \mathbf{y} – p -вектор выходов объекта; $\boldsymbol{\sigma}_\varphi = F(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \boldsymbol{\xi}, \mathbf{f}, t) - \mathbf{A}_0\mathbf{x} - \mathbf{B}_0\mathbf{u}$; \mathbf{u} – m -мерный вектор управляющих сигналов: $\mathbf{u} = (G_T)$, где G_T – расход топлива ГТУ (кг/ч); \mathbf{A}_0 , \mathbf{B}_0 , \mathbf{C} – соответственно $(n \times n)$, $(n \times m)$, $(p \times n)$ -мерные постоянные матрицы, характеризующие линейную стационарную часть, которая может быть приближением, полученным линеаризацией и усреднением во времени элементов матриц, либо обозначать желаемое поведение объекта, \mathbf{x} – вектор состояния

$$\mathbf{x} = (n_{CT}, n_{TK}, N_E)^T,$$

где n_{CT} – частота вращения свободной турбины ГТУ (об/мин); n_{TK} – частота вращения

турбокомпрессора ГТУ (об/мин); N_E – мощность свободной турбины ГТУ (кВт). Возмущение $\mathbf{f} = (N_G)$, где N_G – мощность нагрузки (кВт). В дальнейших выкладках для упрощения расчетов отнесем N_G к состояниям системы. Тогда $\mathbf{A}_0 = \mathbf{A}_m$, $\mathbf{B}_0 = \mathbf{B}_m$, \mathbf{A}_m – гурвицева матрица (устойчива).

Добавим к (2) уравнение адаптивного регулятора в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{U}(\mathbf{x}, \mathbf{K}, \mathbf{z}, \mathbf{g}), \quad (4)$$

где $\mathbf{g} = \mathbf{g}(t)$ – m -мерный вектор сигналов задания, для ГТУ – это заданная частота вращения свободной турбины $n_{CTзад}$; $\mathbf{K} = \mathbf{K}(t)$ – матрица настраиваемых параметров; $\mathbf{z} = \mathbf{z}(t)$ – m -вектор дополнительных (сигнальных) воздействий. Здесь \mathbf{K} и \mathbf{z} – средства адаптации: параметрическая настройка (ПН) и сигнальная настройка (СН) [1].

Пусть задана эталонная модель вида

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}_M\mathbf{x}_M + \mathbf{B}_M\mathbf{g}, \quad (5)$$

где $\mathbf{g} = (n_{CTзад})$. Требуется построить закон управления $\mathbf{u}(t)$, выраженный через минимизацию функционала качества на решениях системы (3), (5), такой, что при любых $\boldsymbol{\xi} \in M$, $\mathbf{x}(t_0)$, $\mathbf{x}_M(t_0)$ выполнялось неравенство

$$\|\mathbf{x}(t) - \mathbf{x}_M(t)\| = \|\mathbf{e}(t)\| \leq 0 \quad (6)$$

для любых $t \geq t_a$, $t_a = t_0 + \theta_a$, $t_0 \geq 0$, где θ_a – время адаптации, или предельное соотношение

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}(t)\| = 0. \quad (7)$$

В работе [1] уравнения алгоритмов задают в общем виде:

$$\dot{\mathbf{K}} = \mathbf{A}_1(\mathbf{K}, \mathbf{e}, \mathbf{g}); \quad \mathbf{K} = [\mathbf{K}_a; \mathbf{K}_b]; \quad (8)$$

$$\mathbf{z} = \mathbf{A}_2(\mathbf{e}, \mathbf{g}, \boldsymbol{\xi}, t), \quad (9)$$

из них первое уравнение (7) соответствует параметрической настройке (ПН), а второе (8) – сигнальной настройке (СН). Структура системы показана на рис. 1.

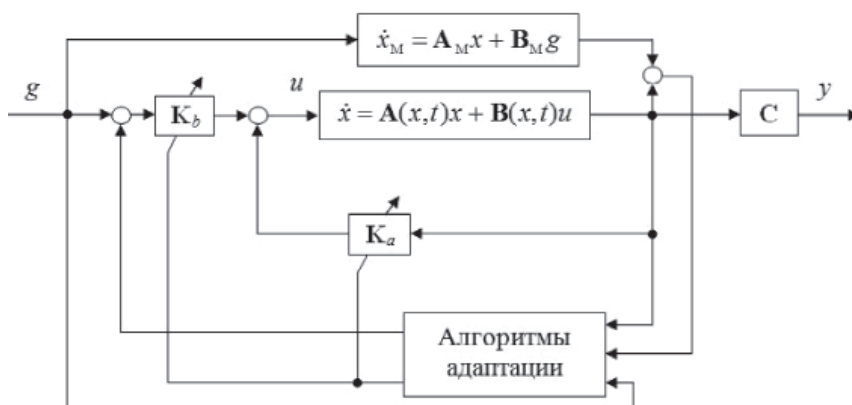


Рис. 1. Структурная схема системы с параметрической и сигнальной настройкой [4]

В работе [1] обосновывается рекомендация использовать для схемы на рис. 1 параметрическую настройку при существенном преобладании нестационарных свойств; сигнальную настройку при преобладании нелинейных свойств и совместно оба типа настройки при обоюдном проявлении нелинейных и нестационарных свойств.

Поскольку в рассматриваемой модели ГТУ в первую очередь проявляются нелинейные свойства, далее рассматривается САУ исключительно с сигнальной настройкой.

В качестве метода адаптации целесообразно выбрать метод функций Ляпунова из соображений сокращения времени поиска экстремума [1]. В работе [1] получен следующий алгоритм для сигнальной адаптации:

$$\mathbf{z}(t) = -h \operatorname{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}); h > 0, \quad (10)$$

где $(\operatorname{sgn} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e})_i = \operatorname{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e})_i$, матрица \mathbf{P} является решением матричного уравнения

$$\mathbf{P} \mathbf{A}^T + \mathbf{A}^T \mathbf{P} = -\mathbf{Q},$$

где матрицу \mathbf{Q} рекомендуется выбирать диагональной (> 0).

Математическая модель

Поэлементная многорежимная динамическая математическая модель ГТУ содержит большое число нелинейных элементов и нелинейных связей и, как правило, требует последовательных приближений при проведении расчетов [2]. Поэтому для синтеза алгоритмов управления и испытания САУ ГТУ применяют упрощенные модели ГТУ, которые получают методом идентификации по данным натурного эксперимента или по данным, полученным на поэлементной многорежимной модели [5, 6].

Рассмотрим упрощенную динамическую модель ГТУ, полученную с помощью идентификации методом наименьших квадратов. Структура дифференциальных уравнений выбрана с учетом априорной информации об основных физических принципах преобразования энергии в ГТУ. Модель сохраняет допустимую адекватность для работы САУ ГТУ в режиме стабилизации частоты вращения свободной турбины ГТУ от холостого хода до 1,2 номинальной нагрузки. На рис. 2 изображена структурная схема полученной модели ГТУ.

На рис. 2 показана структура модели: $n_{TS} = f(G_T)$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая преобразование расхода топлива (кг/ч) в обороты турбокомпрессора (об/мин); $T(n_{TK})$ – постоянная времени турбокомпрессора, зависящая от текущей частоты вращения турбокомпрессора; $N_E = f(n_{TK})$ – нелинейная статическая характеристика, отражающая преобразование частоты вращения турбокомпрессора (об/мин) в мощность свободной турбины (кВт); N_G – мощность нагрузки (кВт); $J(n_{CT})$ – суммарный приведенный к валу свободной турбины момент инерции; n_{CT} – частота вращения свободной турбины (об/мин). Уравнения, описывающие динамические звенья на рис. 2, имеют следующий вид

а) Уравнение ротора турбокомпрессора:

$$\frac{dn_{TK}}{dt} = \frac{n_{TS} - n_{TK}}{T(n_{TK})}; \quad (11)$$

б) Уравнение свободной турбины:

$$\frac{dn_{CT}}{dt} = \frac{1}{n_{CT} J(n_{CT})} (N_E - N_G). \quad (12)$$

Эталонная модель получается из модели ГТУ (11), (12) линеаризацией вблизи точки номинального режима. Номинальный режим ГТУ – 2500 кВт. Эталонная модель включает в себя помимо уравнений собственно также регуляторы ГТУ. В режиме стабилизации n_{CT} основную роль играют два регулятора САУ ГТУ: регулятор частоты вращения свободной турбины n_{CT} и регулятор дозатора газа. Регуляторы включаются последовательно (рис. 3). Передаточная функция регулятора n_{CT} имеет следующий вид [8]:

$$W_{CT}(p) = k_{\Pi} \frac{k_i + k_f p}{k_i + p}; \quad (13)$$

передаточная функция дозатора газа:

$$W_G(p) = \frac{1 + T_d p}{p} k_d. \quad (14)$$

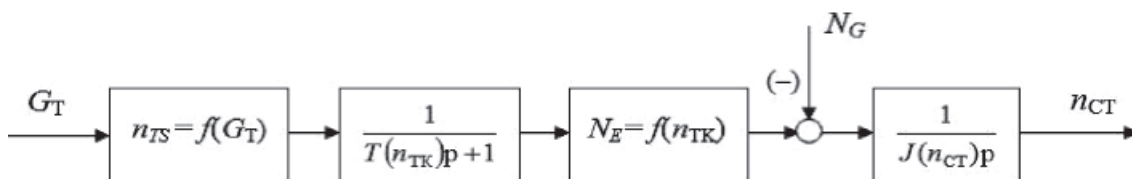


Рис. 2. Структура нелинейной модели ГТУ

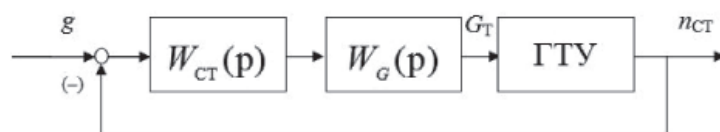


Рис. 3. Эталонная модель ГТУ

Регуляторы настроены на симметричный оптимум, что обеспечивает нулевую статическую ошибку по возмущению. Параметры линеаризованной эталонной модели ГТУ приняты следующими:

$$T(n_{TK}) = 0,5 = \text{const};$$

$$n_{TS}/G_T = \text{const} = k_1 = 11,12;$$

$$N_E/n_{TK} = \text{const} = k_2 = 0,26;$$

$$J(n_{CT}) = \text{const} = 2,88.$$

Тогда параметры регуляторов (13) и (14) для обеспечения (25) с $T_\mu = 0,1$ будут следующими:

$$T_d = 2; \quad k_d = 0,5; \quad k_f = 4;$$

$$k_i = 10; \quad k_{II} = 5,67.$$

Сигнал задания

$$g = (n_{CT\text{зад}}) = 5500 \text{ об/мин.}$$

Вектор состояния представим в виде

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T,$$

где $x_1 = n_{CT}$, $x_2 = n_{TK}$, x_3 – выход интегратора регулятора дозатора газа (14), x_4 – выход интегратора регулятора n_{CT} (13). Тогда сигнальный алгоритм (10) получим в следующем виде:

$$\mathbf{z}(t) = -h \operatorname{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e}) = -h \operatorname{sgn}(242,1571e_1 + 55,5178e_2 + 1837,0398e_3 - 461,4907e_4). \quad (15)$$

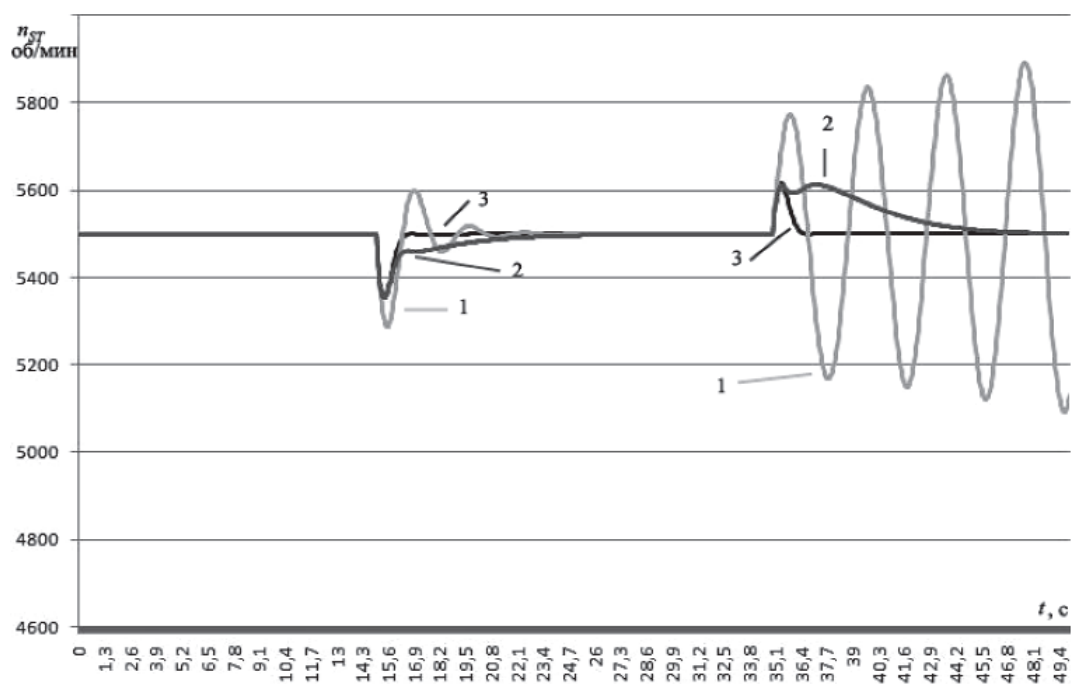


Рис. 4. Переходный процесс n_{CT} (частота вращения свободной турбины):
1 – нелинейная модель ГТУ с неадаптивной САУ;
2 – нелинейная модель ГТУ с адаптивной САУ; 3 – эталонная модель ГТУ

Для проведения эксперимента эталонная модель включается параллельно с нелинейной моделью ГТУ по схеме на рис. 1. В эксперименте учитывался только один вид нелинейности: зависимость $T(n_{TK})$, при этом T меняется от 3 с (холостой ход 140 кВт) до 0,5 с (номинальный режим 2500 кВт). На рис. 4 показано изменение во времени n_{CT} . В качестве возмущения задавалось изменение внешней нагрузки ГТУ $f = (N_G)$ по прямоугольному закону:

$$t = 0-15 \text{ с}; N_G = 140 \text{ кВт};$$

$$t = 15-35 \text{ с}; N_G = 2000 \text{ кВт};$$

$$t = 35-50 \text{ с}; N_G = 500 \text{ кВт}.$$

На рисунке представлены три графика: эталонная модель ГТУ; нелинейная модель ГТУ с неадаптивной САУ (настройки регуляторов, как у эталонной модели); нелинейная модель ГТУ с адаптивной САУ (с эталонной моделью и сигнальной настройкой (15)).

Прочие переменные вектора x также успешно приближаются к переменным эталонной модели. Дальнейшие эксперименты показали достаточно высокую чувствительность рассмотренной системы с эталонной моделью к резким изменениям параметров нелинейной модели.

Исследования также показали, что если в уравнении алгоритма сигнальной адаптации (15) оставить только один сигнал

$$z(t) = -h \operatorname{sgn}(\mathbf{B}^T \mathbf{P}e) = -h \operatorname{sgn}(242,1571e_1)$$

по внешней переменной – частоте вращения свободной турбины n_{CT} – то кратность изменения параметров может быть существенно повышена, качество регулирования по n_{CT} также значительно улучшается. Однако в этом случае по эталонной модели настраивается только n_{CT} , по остальным переменным $x = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T$ переходные процессы существенно отличаются от поведения эталонной модели, что, помимо прочего, ставит вопрос физической реализуемости. Поэтому целесообразно экспериментальным путем установить допустимую кратность изменения переменных (таблица).

В качестве критерия качества взят следующий критерий:

а) максимальное отклонение переменных САУ от эталонной модели не превосходит 15 %;

б) время переходного процесса не более чем в 5 раз превосходит время переходного процесса эталонной модели. В качестве условия устойчивости – нарушение устойчивости САУ.

В качестве модели 1 рассматривалась модель, представленная на рис. 2, при учете $T(n_{TK})$, но без учета нелинейных зависимостей:

$$N_E = f(n_{TK}), \quad n_{TS} = f(G_T).$$

В качестве модели 2 – модель на рис. 2 с учетом всех нелинейностей:

$$T(n_{TK}), N_E = f(n_{TK}), \quad n_{TS} = f(G_T).$$

Допустимая кратность изменения переменных

	Удовлетворяет критериям качества	Удовлетворяет условию устойчивости
Модель 1 с адаптивной САУ с одной переменной	14	16
Модель 1 с адаптивной САУ с четырьмя переменными	8	60
Модель 2 с адаптивной САУ с одной переменной	8	16
Модель 2 с адаптивной САУ с четырьмя переменными	2	5

Как видим из таблицы, диапазон кратности, удовлетворяющий условию устойчивости, значительно выше диапазона кратности, удовлетворяющего критериям качества, также выявлено, что диапазон измерений в линейной модели с адаптивной САУ шире, чем соответствующая ей нелинейная модель.

При введении ограничения по расходу топлива ситуация резко ухудшается.

Выводы

Методика адаптивного управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой [1] в принципе может быть работоспособна при управлении ГТУ. Однако необходимо учитывать диапазон изменения параметров, что существенно влияет на результаты адаптации. Кроме того, следует учитывать физические ограничения, среди которых одним из ведущих является ограничение по расходу топлива G_T . Полученные результаты требуют проведения на полученной основе дальнейших исследований.

Список литературы

1. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модельным управлением. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1984. – 216 с.
2. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 82 с.
3. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А. и др. Автоматика и регулирование авиационных двигателей и энергетических установок, Т.5. – М.: Машиностроение, 2008. – 190 с.
4. Кавалеров Б.В. Автоматизация испытаний САУ ГТУ газотурбинных мини-электростанций при проектировании и настройке // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 12–17.
5. Кавалеров Б.В., Казанцев В.П., Шмидт И.А., Рязанов А.Н., Один К.А. Интеллектуализация испытаний конвертированных газотурбинных установок для электроэнергетики // Системы управления и информационные технологии. – 2012. – № 1(47)ю. – С. 84–88.
6. Килин Г.А., Один К.А., Кавалеров Б.В. Структурно-параметрическая идентификация модели газотурбинной установки на основе генетического алгоритма // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11–7. – С. 1480–1484.
7. Полулях А.И., Лисовин И.Г., Кавалеров Б.В., Шигапов А.А. Автоматизация настройки регуляторов газотурбинных мини-электростанций при компьютерных испытаниях // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 6. – С. 14–17.

References

1. Borcov Ju.A., Poljahov N.D., Putov V.V. Jelektromehaničeskie sistemy s adaptivnym i modelnym upravleniem. L.: Jenergoatomizdat. Leningr. otdelenie, 1984. 216 p.

2. Golberg F.D., Batenin A.V. Matematicheskie modeli gazoturbinnih dvigatelej kak obektov upravlenija. M.: Izd-vo MAI, 1999. 82 p.

3. Inozemcev A.A., Nihamkin M.A. i dr. Avtomatika i regulirovanie aviacionnyh dvigatelej i jenergetičeskikh ustanovok, T.5. M.: Mashinostroenie, 2008. 190 p.

4. Kavalero B.V. Avtomatizacija ispytanij SAU GTU gazoturbinnih mini-jelektrostancij pri proektirovanii i nastrojke // Avtomatizacija v promyšlennosti. 2011. no. 1. pp. 12–17.

5. Kavalero B.V., Kazancev V.P., Shmidt I.A., Rjazanov A.N., Odin K.A. Intelktualizacija ispytanij konvertirovannyh gazoturbinnih ustanovok dlja jelektrojenergetiki // Sistemy upravlenija i informacionnye tehnologii. 2012. no. 1(47) ju. pp. 84–88.

6. Kilin G.A., Odin K.A., Kavalero B.V. Strukturno-parametricheskaja identifikacija modeli gazoturbinoj ustanovki na osnove geneticheskogo algoritma // Fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 11–7. pp. 1480–1484.

7. Poluljah A.I., Lisovin I.G., Kavalero B.V., Shigapov A.A. Avtomatizacija nastrojki reguljatorov gazoturbinnih mini-jelektrostancij pri kompjuternyh ispytanijah // Avtomatizacija v promyšlennosti. 2011. no. 6. pp. 14–17.

Рецензенты:

Шулаков Н.В., д.т.н., профессор кафедры электротехники и электромеханики, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь;

Казанцев В.П., д.т.н., профессор кафедры микропроцессорных средств автоматизации, ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь.