

УДК 621.311.238:681.513.66

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

**Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.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 параметрической настройки. В этой модели ГТУ в первую очередь проявляются нестационарные 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. Рассмотрена работоспособность алгоритма с параметрической настройкой на численном примере. Обсуждаются результаты компьютерных экспериментов и сделаны выводы, что, несмотря на простоту параметрической настройки, нужно учитывать диапазон изменения параметров и физические ограничения данной модели. Доказано, что параметрическая настройка обладает одним неоспоримым достоинством – показатели качества в переходных процессах системы значительно лучше, чем в системе с сигнальной настройкой.

**Ключевые слова:** адаптивное управление, система автоматического управления, газотурбинная установка, моделирование

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

**Ziyatdinov I.R., Kavalеров B.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 parameter settings is application. Furthermore, nonstationary properties manifested in this model gas turbine units (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 automatic control system (ACS) GTU, which are obtained by identification. The numerical example reviewed performance of the algorithm parameter settings. 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. Prove that the parametric configuration has one indisputable advantage – quality indicators in the transient system is much better than in a system with signal setting.

**Keywords:** adaptation control, automatic control system, power gas turbine, simulation

В России уже достаточно давно освоено выпуск авиационных газотурбинных установок (ГТУ) для нужд электроэнергетики [9, 8]. Как известно, ГТУ является работоспособной только при наличии системы автоматического управления (САУ), поэтому задачам совершенствования САУ ГТУ для авиации уделяется самое серьезное внимание [4]. При управлении наземными электроэнергетическими ГТУ возникают специфические проблемы, связанные с особенностями функционирования синхронного генератора как объекта управления и с необходимостью обеспечения требуемых параметров электропотребления [8]. Поэтому оправдан поиск перспективных алгоритмов управления ГТУ для обеспечения качества вырабатываемой электроэнергии во всех эксплуатационных режимах и с учетом нелинейных свойств объекта управления – синхронного генератора. Более того, актуальна проблема оптимизации перспективных САУ для на-

земных ГТУ можно одновременно рассматривать как площадку для отработки перспективных решений для авиации. Среди перспективных САУ в первую очередь обращает на себя внимание возможность использования механизмов адаптации, то есть построение САУ ГТУ в классе адаптивных систем [3, 10]. В первую очередь рассматривались адаптивные системы управления с эталонной моделью, построенные по рекомендациям из [3, 10]. В работах [1, 5] мы рассмотрели схему с эталонной моделью и сигнальной настройкой. В этой статье рассматривается схема с эталонной моделью и параметрической настройкой.

В работе [3] рекомендовано использовать параметрическую настройку при существовании преобладании нестационарных свойств; сигнальную настройку при преобладании нелинейных свойств, и совместно оба типа настройки при обоюдном проявлении нелинейных и нестационарных свойств (рис. 1).

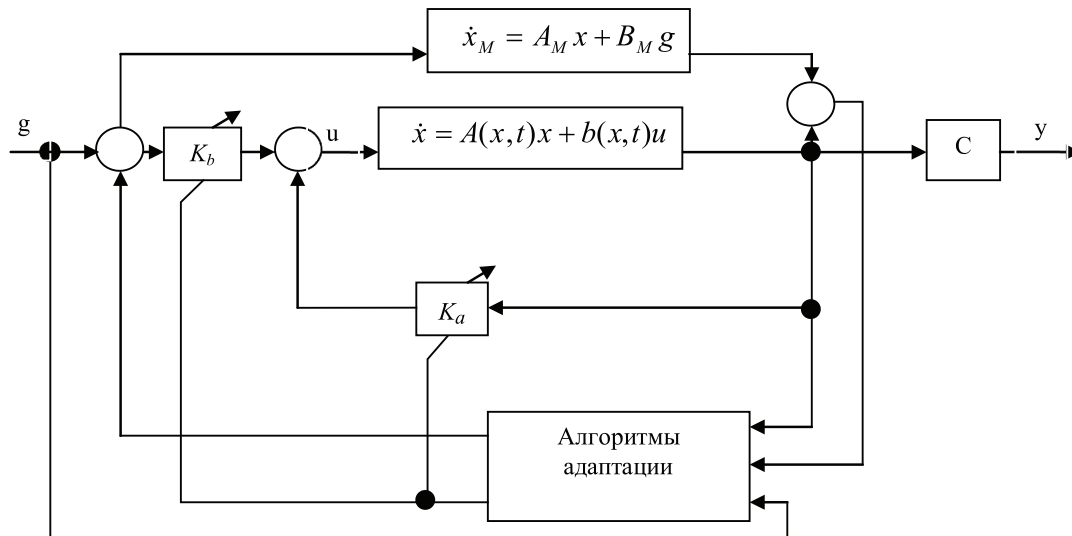


Рис. 1. Структурная схема системы с параметрической и сигнальной настройкой

В связи с этим исследование параметрической настройки в дальнейшем проводится для модели ГТУ, в которой явно проявляются нестационарные свойства.

В качестве метода адаптации, как и в статье [5], целесообразно выбрать метод функций Ляпунова из соображений сокращения времени поиска экстремума [3].

В работе [5] предложен следующий алгоритм для параметрической адаптации:

$$\dot{\delta} = -\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{v}^T \mathbf{\Gamma};$$

$$\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(\gamma_1, \dots, \gamma_{n+m}); \quad \gamma_i > 0, \quad (1)$$

где  $\dot{\delta}$  – это вектор добавочных коэффициентов, которые корректируют параметры регуляторов САУ;  $\mathbf{v}$  – расширенный вектор состояния нестационарной системы;  $\mathbf{B}$  – матрица управления эталонной модели; матрица  $\mathbf{P}$  является решением матричного уравнения  $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}$ , где матрицу  $\mathbf{Q}$  рекомендуется выбирать диагональной положительно определенной;  $\mathbf{e}$  – вектор ошибки между эталонной моделью и испытуемой нестационарной системой;  $\mathbf{\Gamma}$  – диагональная положительно определенная матрица, которая выбирается согласно рекомендациям [3].

#### Линейная нестационарная модель ГТУ для исследования адаптивных регуляторов

Для исследования параметрической настройки построим модель ГТУ. Для этого используем упрощенную динамическую модель ГТУ, полученную с помощью идентификации методом наименьших квадратов [6]. Модель сохраняет допустимую

адекватность для работы САУ ГТУ в режиме стабилизации частоты вращения свободной турбины ГТУ от холостого хода до 1,2 номинальной нагрузки.

Линейная модель состоит из двух уравнений:

а) уравнение ротора турбокомпрессора:

$$\frac{dn_{\text{ТК}}}{dt} = \frac{n_{\text{ТС}} - n_{\text{ТК}}}{T_{\text{T}}}; \quad (2)$$

б) уравнение свободной турбины:

$$\frac{dn_{\text{СТ}}}{dt} = \frac{1}{T_{\text{СТ}}}(N_E - N_G), \quad (3)$$

где обозначено  $T_{\text{СТ}} = n_{\text{СТ}} J$  – постоянная времени свободной турбины;  $\dot{n}_{\text{ТК}}$  – производная приведенной частоты вращения ротора турбокомпрессора по времени;  $n_{\text{ТК}}$  – приведенная частота вращения ротора турбокомпрессора;  $n_{\text{СТ}}$  – частота вращения ротора свободной турбины;  $n_{\text{ТС}}$  – частота вращения ротора турбокомпрессора, взятая по статической характеристике;  $J$  – суммарный приведенный к валу момент инерции свободной турбины;  $T_{\text{T}}$  – постоянная времени ротора турбокомпрессора;  $N_E$  – располагаемая мощность свободной турбины;  $N_G$  – потребляемая мощность нагрузки (синхронного генератора).

Таким образом, передаточную функцию линейной модели можно представить в виде

$$W(p)_{\text{ГТУ}} = \frac{K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{(T_{\text{ТК}} p + 1) \cdot T_{\text{СТ}} p}, \quad (4)$$

где  $K_1$  – коэффициент усиления постоянного времени турбокомпрессора,  $K_2$  – коэффициент

преобразования  $n_{TK}$  в  $N_E$ ;  $K_3$  – коэффициенты усиления постоянного времени свободной турбины.

Для получения нестационарной модели в ее состав включены нестационарные блоки: НсБ<sub>1</sub>, НсБ<sub>2</sub>.

На рис. 2 изображена структурная схема полученной модели ГТУ [6, 7]. Здесь обозначено:  $G_T$  – расход топливного газа.

На рис. 3 показана нестационарная линейная модель ГТУ в составе САУ с двумя регуляторами, включенными по схеме подчиненного регулирования [2]. Внутренний регулятор пропорционально-интегральный, внешний – пропорциональный.

Передачная функция ПИ – регулятора турбокомпрессора имеет вид

$$W(p) = K_{p1} \left( 1 + \frac{1}{T_p} p \right), \quad (5)$$

где  $K_{p1}$  – коэффициент усиления ПИ регулятора;  $T_p$  – постоянная времени ПИ-регулятора. На этом же рисунке обозначен  $K_{p2}$  – коэффициент усиления П-регулятора свободной турбины.

### Параметрическая настройка по трем переменным

Рассмотрим работоспособность алгоритма (1) параметрической настройки на численном примере. Заданы следующие значения параметров модели (2)–(4):

$$K_1 = 44,72; \quad K_2 = 1; \quad K_3 = 0,26315;$$

$$T_{TK} = 0,5; \quad T_{TK} = 0,5; \quad K_{p1} = 0,074;$$

$$K_{p2} = 2,5; \quad T_p = 0,5.$$

Нестационарные блоки заданы следующим образом:

$$\text{НсБ}_1 - k_1(t) = 0,5t + 44,72;$$

$$\text{НсБ}_2 - k_2(t) = 0,5t + 1.$$

Эталонная модель представлена в пространстве состояний.

Для этого вначале следует преобразовать структурную схему на рис. 3 выделив явно все единичные интеграторы (рис. 4).

Уравнения пространства состояний:

$$\dot{x}_1 = K_1 \cdot x_2;$$

$$\dot{x}_2 = K_2 \cdot (x_3 + K_{p1} \cdot (K_{p2} \cdot (r - x_1) - x_2) - K_3 \cdot x_2);$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{T_p} \cdot K_{p1} \cdot (K_{p2} \cdot (r - x_1) - x_2), \quad (6)$$

где  $x_1$  – частота вращения свободной турбины;  $x_2$  – частота вращения турбокомпрессора;  $x_3$  – выход интегратора ПИ-регулятора. Тогда матрица коэффициентов эталонной модели примет вид

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 0,092 & 0 \\ -8,27 & -5,3 & 44,72 \\ -0,37 & -0,148 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

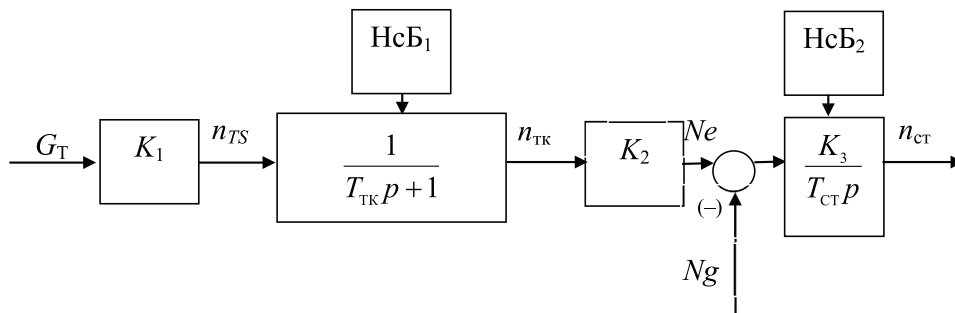


Рис. 2. Линейная нестационарная модель ГТУ

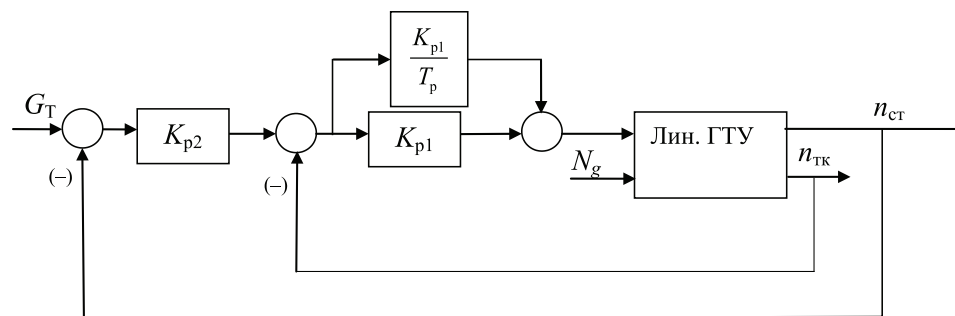


Рис. 3. Нестационарная линейная модель ГТУ в составе САУ

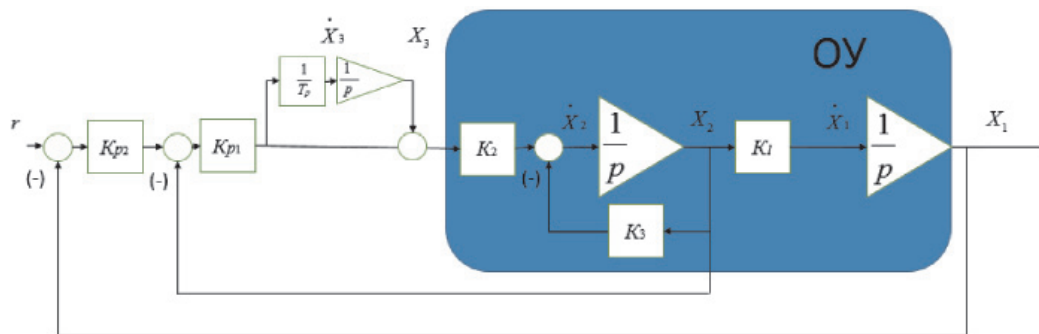


Рис. 4. Преобразованная структурная схема

Матрица управления ЭМ:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 8,27 \\ 0,37 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

В зависимости от выбора матрицы  $\mathbf{Q}$  матрица  $\mathbf{P}$  и результат параметрической настройки будет различным. По результатам экспериментов была выбрана следующая матрица  $\mathbf{Q} = \text{diag}(-10 \ -10 \ -10)$ .

В результате расчета по уравнению  $\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} = -\mathbf{Q}$  матрица  $\mathbf{P}$  имеет следующий вид:

$$\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 137,112 & 2,243 & -50,488 \\ 2,326 & 0,986 & -0,336 \\ -24,62 & 0,112 & 278,645 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

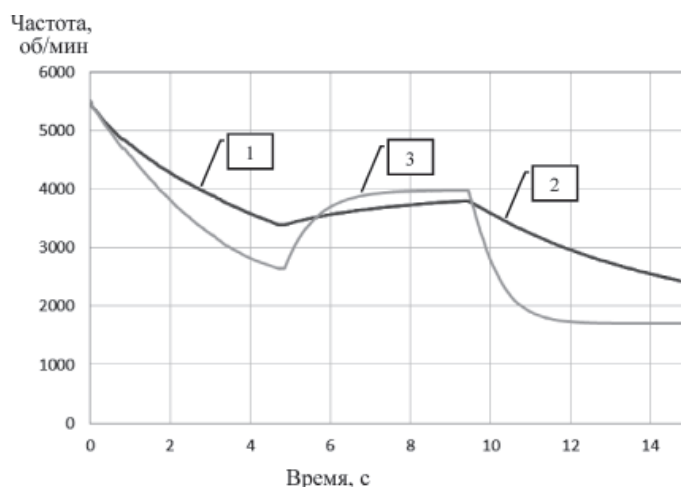
Алгоритм параметрической адаптации получаем в следующем виде

$$\begin{aligned} \dot{\delta} &= -\mathbf{B}^T \mathbf{P} \mathbf{e} \mathbf{v}^T \mathbf{\Gamma} = \\ &= (10,119e_1 - 8,191e_2 - 103,097e_3) \mathbf{v}^T \mathbf{\Gamma}. \end{aligned} \quad (10)$$

Вектор производных добавок  $\dot{\delta}$  является трехмерным. Из них  $\delta_1$  добавляется к  $K_{p2}$ ,  $\delta_2$  добавляется к  $K_{p1}$ ,  $\delta_3$  добавляется к  $\frac{1}{T_p}$ .

Возмущение  $N$  подавалось на 5 секунде (сброс от 2000 до 1000 кВт) и на 9,5 секунде (наброс с 1000 до 2500 кВт). На рис. 5 показаны результаты моделирования. Здесь обозначено: 1 – эталонная модель; 2 – линейная нестационарная модель с параметрической настройкой; 3 – линейная нестационарная модель без параметрической настройки.

Как мы видим по графику, линейная нестационарная модель (3) без параметрической настройки ведет себя существенно хуже эталонной модели (стационарной). Исключим ее из сравнительного анализа для подробного ознакомления с временными характеристиками систем с эталонной моделью (1) и с линейной моделью с параметрической настройкой (2) для первого участка, показанного на рис. 5 (взяв отрезок в пределах от 0,3 до 0,5 с). В результате получаем, что модель параметрической настройкой выполняет колебания вокруг траектории эталонной модели, с течением времени амплитуда колебаний уменьшается (рис. 6).

Рис. 5. Временные характеристики (частота вращения свободной турбины  $n_{CT}$  ГТУ)

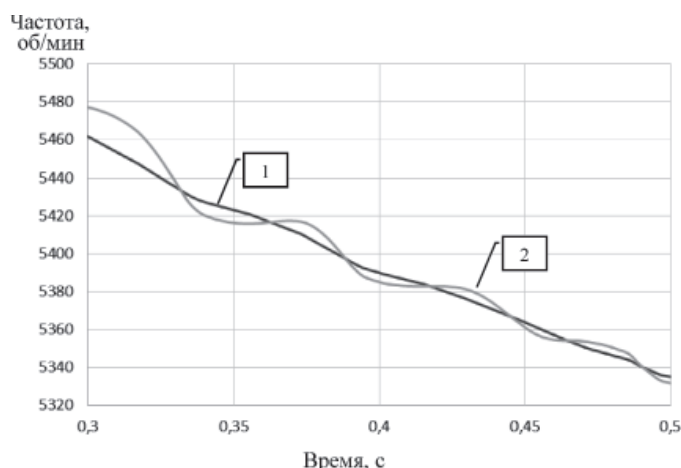


Рис. 6. Временные характеристики (частота вращения свободной турбины  $n_{CT}$  ГТУ)

### Вывод

Методика адаптивного управления с эталонной моделью и параметрической настройкой может быть работоспособна при управлении нестационарными 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  $G_T$ . Проверка с нелинейной моделью подтвердила вывод из работ [3, 10], что параметрическая настройка работоспособна для нестационарной модели, а для нелинейной модели качество работы резко ухудшается. Полученные результаты требуют проведения на полученной основе дальнейших исследований.

### Список литературы

1. Бахирев И.А., Басаргин Ш.Д., Кавалеров Б.В. Адаптивное управление газотурбинной установкой с эталонной моделью и сигнальной настройкой // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 2. – С. 71–76.
2. Башарин А.В., Новиков В.А., Соколовский Г.Г. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 392 с.
3. Борцов Ю.А., Поляхов Н.Д., Путов В.В. Электромеханические системы с адаптивным и модальным управлением. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 216 с.
4. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. – М.: Изд-во МАИ, 1999. – 82 с.
5. Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В., Бахирев И.В. Исследование системы управления с эталонной моделью и сигнальной настройкой для электроэнергетической газотурбинной установки // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 6–2. – С. 235–240.
6. Зиятдинов И.Р., Махнутин А.К., Кавалеров Б.В. Исследование линейных алгоритмов управления газотурбинными установками // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 2. URL: www.science-education.ru/122-21395 (дата обращения: 09.09.2015).
7. Зиятдинов И.Р., Кавалеров Б.В. Исследование нелинейных алгоритмов управления газотурбинными установками // Современные проблемы науки и образования. –

2015. – № 2; URL: www.science-education.ru/129-22962 (дата обращения: 19.11.2015).

8. Кавалеров Б.В. Автоматизация испытаний САУ ГТУ газотурбинных мини-электростанций при проектировании и настройке // Автоматизация в промышленности. – 2011. – № 1. – С. 12–17.

9. Махнутин А.К., Кавалеров Б.В. О вопросах применения газотурбинных установок и парогазовых установок в энергетике // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2015. – № 15. – С. 84–96.

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

### References

1. Bakhirev I.A., Basargin Sh.D., Kavalero B.V Adaptive control of gas turbine with the reference model and the signal setting // Control systems and information technology. 2015. no 2. pp. 71–76.
2. Basharin A.V., Novikov V.A., Sokolovsky G.G. Management of electric. L. Energoatomizdat. Leningrad. Office, 1982. 392 p.
3. Bortsov Y.A., Polyakhov N.D., Putov V.V. Electromechanical systems with adaptive and model management. L. Energoatomizdat. Leningrad. Office, 1984. 216 p.
4. Golberg F.D., Batenin A.V. Mathematical models of gas turbine engine as a control object. Moscow, Publishing House of the Moscow Aviation Institute, 1999. 82 p.
5. Ziyatdinov I.R., Kavalero B.V., Bakhirev I.V. Research management systems with a reference model and a signal for setting the electric power the gas turbine plant // Basic research. 2015. no 6–2. pp. 235–240.
6. Ziyatdinov I.R., Mahnutin A.K., Kavalero B.V. Research of gas turbine units linear control algorithms. Modern problems of science and technology, 2015, no 2; URL: www.science-education.ru/122-21395 (дата обращения: 09.09.2015).
7. Ziyatdinov I.R., Kavalero B.V. Research of gas turbine units nonlinear control algorithms. Modern problems of science and technology, 2015, no 2 URL: www.science-education.ru/129-22962 (дата обращения: 19.11.2015).
8. Kavalero B.V. Automation of testing gas turbine GTU SAU mini-power plants in the design and configuration // Automation in the industry. 2011, no 1. pp. 12–17.
9. Mahnutin A.K., Kavalero B.V. On the application of gas turbines and combined cycle power plants in the energy sector // Herald PNIPIU. Electrical engineering, information technology, control systems. -2015. no 15. pp. 84–96.
10. Manual control theory / edited. A.A. Krasovski. M. : Nauka, 1987. pp. 712.