

УДК 62-523.3:62-522.2

СИНТЕЗ СИСТЕМ РЕГУЛИРОВАНИЯ ПЕРВИЧНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Мельников Д.В., Чжо Ту Аунг, Окар Мин, Мин Чжо Ту

*Калужский филиал, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»,
Калуга, e-mail: melnikov-dv@yandex.ru*

В статье на базе современных проекционно-матричных методов представлен алгоритм параметрического синтеза системы регулирования первичного двигателя электрических синхронных генераторов, которым служит паровая турбина. Алгоритм основан на представлении процессов в форме разложения по базисной системе функций, использует аппарат структурных преобразований и методы математического программирования. Отличительной особенностью алгоритма является его ориентация на класс нелинейных систем, причем количество нелинейных элементов не имеет принципиальных ограничений и существенно не отражается на быстродействии вычислительных алгоритмов. Это стало возможно благодаря разработке «быстрых» алгоритмов замены нелинейных элементов соответствующими эквивалентными матричными операторами. В случае детерминированной постановки нелинейный элемент заменяется эквивалентным линейным элементом с переменным коэффициентом передачи, что эквивалентно матричному оператору умножения. Критерий эквивалентности – равенство выходных сигналов нелинейного и эквивалентного ему линейного элемента, заданного матричным оператором, при обработке конкретного входного сигнала. Алгоритм приводится на примере конкретной энергетической турбины, математическая модель которой описывается структурной схемой.

Ключевые слова: энергетическая турбина, генератор, матричный оператор, ортонормированный базис, система регулирования, синтез регулятора, алгоритм, математическая модель

SYNTHESIS OF CONTROL SYSTEMS PRIME MOVERS SYNCHRONOUS GENERATORS

Melnikov D.V., Kyaw Thu Aung, Oukar Min, Min Chzho Tu

*Kaluga branch of Federal state budgetary educational institution of higher professional education
«Moscow State Technical University named after N.E. Bauman (national research University)»,
Kaluga, e-mail: melnikov-dv@yandex.ru*

The article on the basis of the modern projection-matrix methods the algorithm parametrization of synthesis of system of regulation of the primary motor electric synchronous generators, which is a steam turbine. The algorithm is based on processes in the form of decomposition on basic system functions, uses the machine structural reforms and methods of mathematical programming. A distinctive feature of the algorithm is its focus on a class of nonlinear systems, and the number of nonlinear elements is not fundamental limitations, and not significantly effect on performance of the computational algorithms. It became possible thanks to the development of the «fast» algorithms replacing the nonlinear elements corresponding equivalent matrix operators. In the case of a deterministic formulation of the nonlinear element is replaced by the equivalent linear element with a variable transfer coefficient, which is equivalent to a matrix multiplication operator. Equivalence criterion is the equality of output signals of nonlinear and equivalent linear element defined matrix operator, when developing a specific input signal. The algorithm provides for example, a particular energy include turbine mathematical model which describes the structural scheme.

Keywords: power turbine, generator, matrix operator, orthonormal basis, the regulatory system, the synthesis controller, algorithm, a mathematical model

Одним из наиболее сложных элементов современных энергетических систем является первичный двигатель электрических синхронных генераторов, которым обычно служит паровая турбина со своими системами регулирования. Основным способом получения информации, необходимой для проектирования, эксплуатации и развития электроэнергетических систем, является математическое моделирование [2]. Динамика первичных двигателей существенно влияет на нормальные и аварийные процессы производства, распределения и потребле-

ния электроэнергии. Поэтому требование к уровню адекватности модели первичного двигателя постоянно возрастает. А это означает, что на сегодняшний день описывать модели систем регулирования приходится в классе нелинейных систем.

Наиболее наглядной и исходной формой описания сложной динамической модели энергетической системы является структурная (операторная) схема, которая не только иллюстрирует содержание модели, но и показывает структуру моделируемых объектов, что позволяет легко ориентироваться

в ней и адаптировать ее для конкретных целей. Поэтому актуальной является задача разработки алгоритмов синтеза систем регулирования, заданных структурной схемой.

Решение поставленной задачи осложнено тем, что в настоящее время в электроэнергетических системах находится в эксплуатации множество различных типов турбин и котлоагрегатов с разнообразными системами и законами регулирования. Хотя передаточные функции отдельных элементов и звеньев известны, разработка полной математической модели для конкретного типа оборудования и компоновки первичного двигателя, а также расчета системы регулирования является уникальной [2, 8, 9, 11]. Поэтому возникает задача разработки универсального алгоритма синтеза, который может использоваться для стационарных и нестационарных систем, как для линейных, так и нелинейных систем управления. Такие алгоритмы могут быть построены на использовании метода матричных операторов расчета и проектирования сложных систем [6, 13]. Для иллюстрации таких алгоритмов в работе приводится синтез системы регулирования турбины производства Калужского турбинного завода. Хотя модель не является громоздкой, но на ее примере довольно подробно иллюстрируются все особенности ал-

горитма, что не снижает его общности по отношению к системам высокого порядка [10].

Общий алгоритм синтеза системы регулирования

Рассмотрим систему регулирования турбины ПТ-25/30-90/10М производства Калужского турбинного завода в классе нелинейных систем (рис. 1) [7]. Эта система предназначена для поддержания частоты вращения ротора турбины на требуемом уровне.

На рис. 1 обозначено: φ – относительное отклонение угловой частоты вращения ротора от номинального значения $\omega_{\text{ном}}$; $\varphi = (\omega - \omega_{\text{ном}}) / \omega_{\text{ном}}$; λ – относительное отклонение электрической нагрузки генератора; ξ – относительное изменение расхода пара в турбине; μ – относительное отклонение поршня сервомотора; z – относительное отклонение поршня золотника; δ – степень неравномерности системы регулирования; T_z – постоянная времени золотника; T_ξ – постоянная времени сервомотора; T_μ – постоянная времени камеры эквивалентного объема (время полного заполнения камеры при определенном расходе пара); T_φ – постоянная времени ротора; θ – эквивалентный коэффициент самовыравнивания.

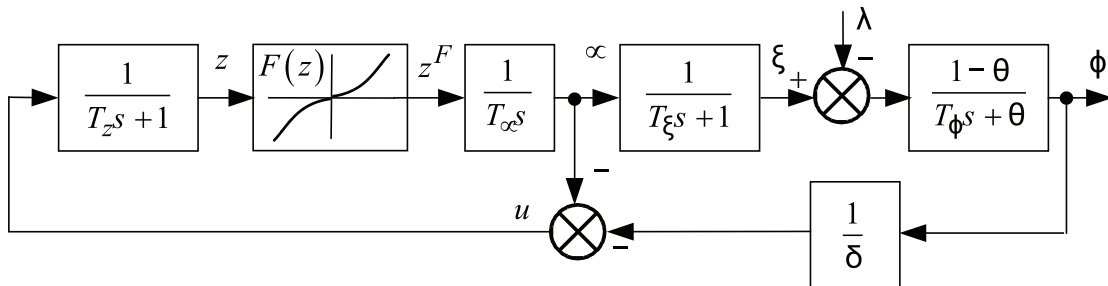


Рис. 1. Структурная схема нелинейной системы регулирования энергетической турбины ПТ-25/30-90/10М (ПТ-12/15-35/10М)

Нелинейность $F(z)$, определяющая форму кромки отсечного золотника, описывается следующей зависимостью:

$$F(z) = \begin{cases} 0, & \text{при } |z| \leq \varepsilon_0; \\ 0,5(z - \text{sign}(z)\varepsilon_0) + 0,25 \frac{(z - \text{sign}(z)\varepsilon_0)^2}{\Delta z_0} \text{sign}(z - \text{sign}(z)\varepsilon_0), & \text{при } |z| \leq \Delta z_0; \\ z - \text{sign}(z)\varepsilon_0 - 0,25\Delta z_0 \text{sign}(z - \text{sign}(z)\varepsilon_0), & \text{при } |z| > \Delta z_0, \end{cases}$$

где Δz_0 – относительные высоты треугольного профиля кромки поршня отсечного золотника; ε_0 – величина, характеризующая степень нечувствительности сервомотора.

Требуется определить параметры системы регулирования δ , T_z , T_μ таким образом, чтобы $\varphi_\delta(t)$ и $\varphi(t)$ (реальный переходной процесс) были близки, например, в средне-квадратическом смысле:

$$\int_0^T [\varphi_\delta(t) - \varphi(t)]^2 dt < \varepsilon.$$

Представим модель системы регулирования турбины с нелинейностью в операторной форме (в матричном виде) (рис. 2).

На схеме обозначено:

$$\mathbf{A}_\varphi = (T_\varphi \mathbf{I} + \theta \mathbf{A}_n)^{-1} (1 - \theta) \mathbf{A}_n;$$

$$\mathbf{A}_\delta = \mathbf{I} / \delta; \quad \mathbf{A}_z = (T_z \mathbf{I} + \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{A}_n;$$

$$\mathbf{A}_\mu = \mathbf{A}_n / T_\mu; \quad \mathbf{A}_\xi = (T_\xi \mathbf{I} + \mathbf{A}_n)^{-1} \mathbf{A}_n,$$

где \mathbf{A}_n – матричный оператор интегрирования. Из рис. 2 имеем следующие векторно-матричные соотношения:

$$\mathbf{C}^u = -\mathbf{A}_\delta \mathbf{C}^\varphi - \mathbf{C}^\mu; \quad \mathbf{C}^z = \mathbf{A}_z \mathbf{C}^u;$$

$$\mathbf{C}^\mu = \mathbf{A}_\mu \mathbf{A}_z^F \mathbf{C}^z; \quad \mathbf{C}^\xi = \mathbf{A}_\xi \mathbf{C}^\mu; \quad \mathbf{C}^\varphi = \mathbf{A}_\varphi (\mathbf{C}^\xi - \mathbf{C}^\lambda);$$

$$\mathbf{C}^\varphi(\mathbf{p}) = \left(\mathbf{I} - \mathbf{A}_\varphi \mathbf{A}_\xi \mathbf{A}_\mu \mathbf{A}_z^F (\mathbf{I} + \mathbf{A}_z \mathbf{A}_\mu \mathbf{A}_z^F)^{-1} (-\mathbf{A}_z \mathbf{A}_\delta) \right)^{-1} \times (-\mathbf{A}_\varphi) \mathbf{C}^\lambda,$$

или

$$\mathbf{C}^\varphi(\mathbf{p}) = \mathbf{A} \mathbf{C}^\lambda; \quad \mathbf{A} = \left(\mathbf{I} - \mathbf{A}_\varphi \mathbf{A}_\xi \mathbf{A}_\mu \mathbf{A}_z^F (\mathbf{I} + \mathbf{A}_z \mathbf{A}_\mu \mathbf{A}_z^F)^{-1} (-\mathbf{A}_z \mathbf{A}_\delta) \right)^{-1} \times (-\mathbf{A}_\varphi).$$

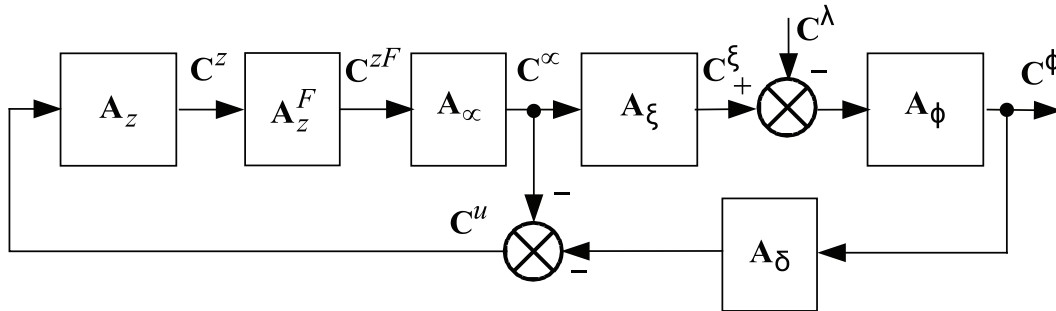


Рис. 2. Структурная схема нелинейной системы регулирования энергетической турбины в операторной форме

Последнее выражение представляет собой матричный оператор всей системы, который связывает спектральные характеристики входного и выходного процессов. Матричный оператор нелинейного элемента вычисляется по формуле [6]:

$$\mathbf{A}^F = \mathbf{A}_y(k(t)) = \{a_{ij}^y\} = \int_0^T \frac{F(\Phi^T(t) \mathbf{C}^z)}{\Phi^T(t) \mathbf{C}^z} \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt. \quad (1)$$

Для вычисления спектральных характеристик остальных процессов системы нужно воспользоваться структурными преобразованиями. В результате можно получить следующие зависимости:

$$\mathbf{C}^\xi = \mathbf{A}_\varphi^{-1} \mathbf{C}^\varphi + \mathbf{C}^\lambda; \quad \mathbf{C}^\mu = \mathbf{A}_\xi^{-1} \mathbf{C}^\xi; \quad \mathbf{C}^u = -\mathbf{A}_\delta \mathbf{C}^\varphi - \mathbf{C}^\mu; \quad \mathbf{C}^z = \mathbf{A}_z \mathbf{C}^u; \quad \mathbf{C}^{zF} = \mathbf{A}_z^F \mathbf{C}^z.$$

Алгоритм, определяющий процедуру решения задачи расчета параметров системы управления турбины, представлен на рис. 3.



Рис. 3. Структурная схема алгоритма синтеза системы регулирования турбины в классе нелинейных систем

Вычислительный алгоритм синтеза системы регулирования первичного двигателя

Рассмотрим подробно алгоритм параметрического синтеза системы регулирования турбины ПТ-25/30-90, представленного на рис. 3.

Этап 1. При заданной структуре регулятора формируем вектор искомых параметров: $\mathbf{p} = [\delta, T_z, T_\mu]$. Здесь же инициализируем вектор параметров начальными приближениями $\mathbf{p}_0 = [1, 1, 1]$.

Этап 2. Накладываем ограничения на параметры, связанные с их физической реализуемостью. Эти ограничения будут пересланы в функцию оптимизации в качестве опции. Данная операция позволяет значительно сократить время поиска оптималь-

ных параметров. Например, все полученные параметры регуляторов должны быть положительными.

Этап 3. Задаем эталонный переходный процесс при резком сбросе нагрузки ($\lambda = -1$):

$$\varphi_3(t) = 0,03 - 0,03e^{(-1,09t)} \cos(3,35t).$$

Стоит обратить особое внимание на то, чтобы эталонный переходный процесс соответствовал требованиям, предъявляемым в [12].

Этап 4. Выбор ортонормированного базиса на промежутке исследования $[0, T]$. В дальнейшем всегда будем использовать ортонормированный базис функций Уолша, упорядоченных по Адамару, и обозначать его \mathbf{H} – квадратная симметричная матрица

размера $l \times l$. Вычисление спектральных характеристик входного и выходного воздействий.

$$C^\lambda = H \cdot \lambda; \quad C^{\Phi_3} = H \cdot \Phi_3,$$

где λ, Φ_3 – вектор-столбцы отсчетов функций $\lambda(t), \Phi_3(t)$ соответственно.

Этап 5. Определяем матричные операторы тех звеньев, параметры которых известны (как правило, это параметры объекта и часть параметров системы управления):

$$A_\Phi = (T_\Phi I + \theta A_n)^{-1} (1 - \theta) A_n;$$

$$A_\xi = (T_\xi I + A_n)^{-1} A_n,$$

где A_n – матричный оператор интегрирования; I – единичная матрица; $\theta = 0,05$ (коэффициент саморегулирования); для ПТ-25/30-90/10М: $T_\Phi = 12$ с, $T_\xi = 0,5$ с. Эти матричные операторы, так же как и спектральные характеристики, рассчитываются один раз и хранятся в памяти ЭВМ.

Этап 6. Определяем матричные операторы звеньев, параметры которых подлежат определению (матричные операторы вычисляются при текущих значениях вектора искомых параметров $p = [\delta, T_z, T_\mu]$).

$$A_\delta(\delta) = I/\delta; \quad A_z(T_z) = (T_z I + A_n)^{-1} A_n;$$

$$A_\mu(T_\mu) = A_n/T_\mu.$$

Здесь же можно задать начальное приближение для выходного сигнала (или его спектральной характеристики C_0^{Φ}).

Этап 7. Вычисление матричных операторов нелинейных звеньев. Для этого необходимо предварительно найти спектральные характеристики процессов на входе нелинейных элементов:

$$C^\xi = A_\Phi^{-1} C^{\Phi_3} + C^\lambda; \quad C^\mu = A_\xi^{-1} C^\xi;$$

$$C^u = A_\delta C_0^{\Phi} - C^\mu; \quad C^z = A_z C^u; \quad z = H C^z;$$

$$A_z^F = A_y(F(z)/z),$$

здесь $A_y(\cdot)$ – матричный оператор умножения функции представленной в скобках; z – вектор-столбец отсчетов функции $z(t)$. Непосредственное применение формулы (1) для вычисления матричного оператора умножения является далеко не эффективным с точки зрения быстродействия его расчета. Так как система Matlab ориентирована на операции с матрицами, то для расчета матричного оператора умножения эффективно использовать следующую функцию:

```
function Ay=m_ymn1(H,f)
```

```
%Матричный оператор умножения
на некоторую функцию
%f – вектор-столбец
%Н – матрица-базис функций Уолша
```

```
Ay=H*(H.*(ones(size(f))*f)') ;
```

Этап 8. Вычисление матричного оператора всей системы и спектральной характеристики выходного сигнала

$$A = \left(I - A_\Phi A_\xi A_\mu A_z^F (I + A_z A_\mu A_z^F)^{-1} \times \right. \\ \left. \times (-A_z A_\delta) \right)^{-1} \times (-A_\Phi);$$

$$C^\Phi(p) = A(p) C^\lambda.$$

Этап 9. Уточнение матричных операторов нелинейных элементов. Для этого проверяем решения задачи анализа при текущих значениях p : степень близости спектральных характеристик выходного сигнала, полученных на текущей и предыдущей итерациях.

$$\|C^\Phi - C_0^{\Phi}\| \leq \Delta_\Phi^0 = 10^{-8}. \quad (2)$$

Если (2) не выполняется, то $C_0^{\Phi} = C^\Phi$, и переходим к этапу 7, если выполняется, то переходим к этапу 10.

Этап 10. Вычисление искомых параметров:

$$J = \|C^{\Phi_3} - C^\Phi(p)\| = \|E(p)\| \rightarrow \min_p. \quad (3)$$

Реализация (3) представляет собой итерационный процесс, в котором параметры меняются в соответствии с выбранным алгоритмом нахождения минимума функции многих переменных. При очередном вычислении целевой функции (3) при конкретных значениях p , следует определять $C^\Phi(p)$, т.е. возвращаться к этапу 6. Если минимум найден, то переходим к анализу системы при найденных параметрах регулятора.

Этап 11. Анализ системы регулирования турбины при найденных параметрах регулятора:

$$\Phi = H C^\Phi; \quad z = H C^z; \quad z^F = H(A_z^F C^z);$$

$$\mu = H C^\mu; \quad \xi = H C^\xi,$$

где $\Phi, \bar{z}, z, \mu, \xi$ – вектор-столбцы отсчетов функций $\Phi(t), \bar{z}(t), z(t), \mu(t), \xi(t)$ соответственно.

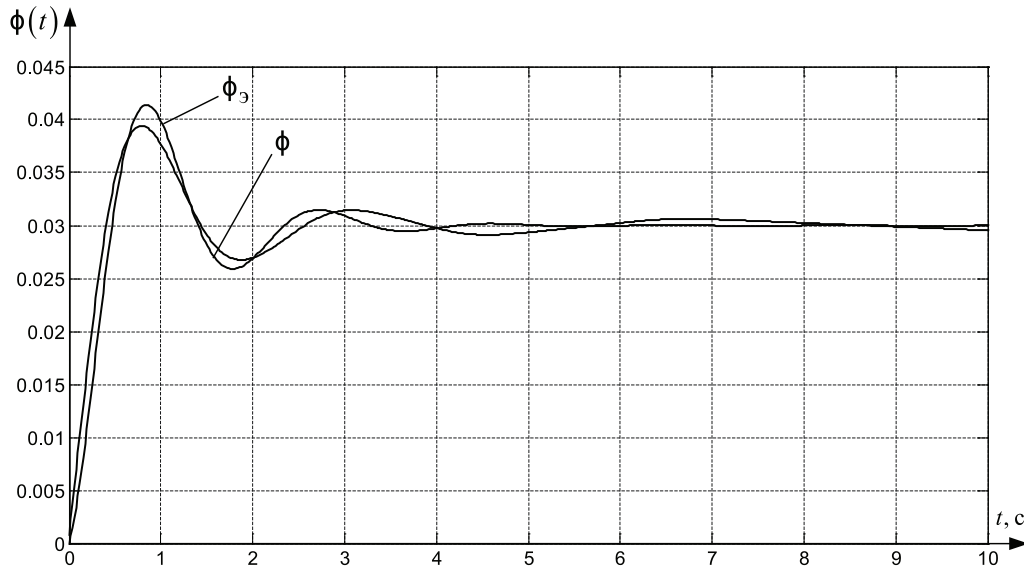


Рис. 4. Эталонный и реальный переходные процессы относительного изменения частоты вращения ротора

Результаты синтеза системы регулирования турбины ПТ-25/30-90/10М представлены на рис. 4 при $\lambda = -1$, $\varepsilon_0 = 0,0167$. Размер базиса составлял 512 функций Уолша. В качестве меры близости спектральных характеристик в выражениях (2) и (3) использовалась евклидова норма. Минимизация целевой функции (3) осуществлялась методом Гаусса – Ньютона, который реализован в среде Matlab с помощью функции `lsqnonlin`. Эта функция позволяет осуществлять условную минимизацию целевых функций, представляющих собой свертку вектора.

Для системы регулирования турбины ПТ-25/30-90/10М были найдены следующие параметры (ограничения на параметры не накладывались):

$$\delta = 0,03; T_z = 0,0630 \text{ с}; T_\mu = 0,1014 \text{ с}; \quad (4)$$

$$J = \|\mathbf{C}^\Phi - \mathbf{C}^\Phi(\mathbf{p})\| = \|\mathbf{E}(\mathbf{p})\| = 0,000780148.$$

Для получения параметров (4) понадобилось 8 итераций. Степень нечувствительности сервомотора составляла $\varepsilon_0 = 0,0167$, что соответствует 0,05% нечувствительности системы регулирования относительно регулируемого процесса $\phi(t)$. В работах [1, 3, 4, 5, 14, 15] отражены детальные алгоритмы построения законов регулирования энергетических систем, в том числе и в робастной постановке, а также алгоритмы решения задач идентификации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаменталь-

ных исследований и Правительства Калужской области (гранты № 14-48-03013, № 16-41-400701).

Список литературы

1. Аунг Ч.С., Макаренков А.М., Мьо П.С. Идентификация случайных параметров математической модели электрогидравлического следящего привода // *Фундаментальные исследования*. – 2016. – № 2–2. – С. 231–235.
2. Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Математическая модель первичных двигателей синхронных генераторов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 216–221.
3. Корнюшин Ю.П., Мельников Д.В., Егупов Н.Д., Корнюшин П.Ю. Исследование и расчет параметров элементов системы регулирования частоты вращения ротора турбины с учетом параметрической неопределенности математической модели // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*. – № 1. – С. 78–93.
4. Мельников Д.В., Егупов Н.Д. Синтез систем регулирования энергетических турбин в условиях параметрической неопределенности // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2011. – № 5–1. – С. 108–113.
5. Мельников Д.В., Корнюшин Ю.П., Мин Чжо Ту, Чжо Ту Аунг, Окар Мин. Алгоритм синтеза системы регулирования частоты вращения ротора энергетической турбины // *Научное обозрение*. – 2015. – № 20. – С. 138–143.
6. Мельников Д.В., Корнюшин П.Ю., Мин Ч.Т., Чжо Т.А., Окар М. Проекционно-матричный подход к анализу и синтезу систем управления электроэнергетических систем // *Научное обозрение*. – 2015. – № 2. – С. 88–97.
7. Мельников Д.В. Метод автоматизированного исследования систем регулирования энергетических турбин при случайных возмущениях: дис. ... канд. техн. наук. – Калуга, 2002.
8. Мельников Д.В., Мин Чжо Ту. Математическая модель систем регулирования энергетических турбин с регулируемыми отборами пара // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2015. – № 2 (38). – С. 13. – <http://engjournal.ru/catalog/pmce/tctp/1366.html>.

9. Мельников Д.В., Окар Мин, Чжо Ту Аунг. Математическое моделирование систем регулирования энергетических турбин // Научное обозрение. – 2015. – № 20. – С. 144–149.

10. Мельников Д.В. Проекционно-матричный метод синтеза контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2013. – № 4 (93). – С. 43–53.

11. Мельников Д.В., Фишер М.Р. Математическая модель контура регулирования частоты вращения ротора паровой турбины К-800-130 // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2011. – № 7. – С. 197–215.

12. Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности // Стандарт организации. Открытое акционерное общество «Системный оператор единой энергетической системы». Издание официальное. – М., 2013. – http://so-ops.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_002-2013_freq_regulation.pdf.

13. Пупков К.А., Егупов Н.Д., Колесников Л.В., Лукашенко Ю.Л., Мельников Д.В., В.М. Рыбин, Трофимов А.И. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / под ред. К.А. Пупкова и Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 664 с.

14. Окар Мин, Мельников Д.В. Алгоритм расчета нелинейных систем управления проекционно-матричным методом // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – № 12 (36). – С. 17. – <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1268.html>.

15. Чжо Ту Аунг, Мельников Д.В. Алгоритм исследования нелинейных систем автоматического управления в стохастических режимах // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2014. – № 4 (28). – С. 3. – <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1270.html>.

References

1. Aung Ch.S., Makarenkov A.M., Mo P.S. Identifikacija sluchajnyh parametrov matematicheskoj modeli jelektrogidravlicheskogo sledjashhego privoda // Fundamentalnye issledovaniya. 2016. no. 2–2. pp. 231–235.

2. Gusev A.S., Svechkarov S.V., Plodistyj I.L. Matematicheskaja model pervichnyh dvigatelej sinhronnyh generatorov // Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. 2005. T. 308. no. 7. pp. 216–221.

3. Kornjushin Ju.P., Melnikov D.V., Egupov N.D., Kornjushin P.Ju. Issledovanie i raschet pa-rametrov jelementov sistemy regulirovaniya chastoty vrashhenija rotora turbiny s uchedom pa-parametricheskoy neopredelenosti matematicheskoj modeli // Vestnik MGTU im. N.Je. Bauma-na. Ser. Estestvennye nauki. no. 1.pp. 78–93.

4. Melnikov D.V., Egupov N.D. Sintez sistem regulirovaniya jenergeticheskikh turbin v uslovijah parametricheskoy neopredelenosti // Izvestija Tulsckogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki. 2011. no. 5–1. pp. 108–113.

5. Melnikov D.V., Kornjushin Ju.P., Min Chzho Tu, Chzho Tu Aung, Okar Min. Algoritm sinteza sistemy regulirovaniya chastoty vrashhenija rotora jenergeticheskoy turbiny // Nauchnoe obo-zrenie. 2015. no. 20. pp. 138–143.

6. Melnikov D.V., Kornjushin P.Ju., Min Ch.T., Chzho T.A., Okar M. Proekcionno-matrichnyj podhod k analizu i sintezu sistem upravlenija jelektrojenergeticheskikh sistem // Nauchnoe obozrenie. 2015. no. 2. pp. 88–97.

7. Melnikov D.V. Metod avtomatizirovannogo issledovaniya sistem regulirovaniya jenergeti-cheskikh turbin pri sluchajnyh vozmushhenijah: dis. ... kand. tehn. nauk. Kaluga, 2002.

8. Melnikov D.V., Min Chzho Tu. Matematicheskaja model sistem regulirovaniya jenergeti-cheskikh turbin s reguliruemymi otborami para // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2015. no. 2 (38). pp. 13. <http://engjournal.ru/catalog/pmce/tcpt/1366.html>.

9. Melnikov D.V., Okar Min, Chzho Tu Aung. Matematicheskoe modelirovanie sistem regulirovaniya jenergeticheskikh turbin // Nauchnoe obozrenie. 2015. no. 20. pp. 144–149.

10. Melnikov D.V. Proekcionno-matrichnyj metod sinteza kontura regulirovaniya chastoty vrashhenija rotora parovoj turbiny // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. N.Je. Baumana. Serija: Mashinostroenie. 2013. no. 4 (93). pp. 43–53.

11. Melnikov D.V., Fisher M.R. Matematicheskaja model kontura regulirovaniya chastoty vra-shhenija rotora parovoj turbiny K-800-130 // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehniceskogo universiteta im. N.Je. Baumana. Serija: Mashinostroenie. 2011. no. 7. pp. 197–215.

12. Normy uchastija jenerglobokov teplovyh jelektrostan-cij v normirovannom pervichnom regu-lirovanii chastoty i avtomaticheskom vtorichnom regulirovanii chastoty i peretokov aktivnoj moshhnosti // Standart organizacii. Otkrytoe akcioner-noe obshhestvo «Sistemnyj operator edinoj jenergeticheskoy sistemy». Izdanie oficialnoe. M., 2013. http://so-ops.ru/fileadmin/files/laws/standards/sto_002-2013_freq_regulation.pdf.

13. Pupkov K.A., Egupov N.D., Kolesnikov L.V., Lu-kashenko Ju.L., Melnikov D.V., V.M. Ry-bin, Trofimov A.I. Matrichnye metody rascheta i proektirovaniya slozhnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija dlja inzhenerov / pod red. K.A. Pupkova i N.D. Egupova. M.: Izdatelstvo MGTU im. N.Je. Baumana, 2007. 664 p.

14. Okar Min, Melnikov D.V. Algoritm rascheta nelinejnyh sistem upravlenija proek-cionno-matrichnym metodom // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2014. no. 12 (36). pp. 17. <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1268.html>.

15. Chzho Tu Aung, Melnikov D.V. Algoritm issledovaniya nelinejnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija v stohasticheskikh rezhimah // Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. 2014. no. 4 (28). pp. 3. <http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1270.html>.