DOI 10.21778/2413-9599-2018-1-6-11 УДК 517.977.58

Д. В. Мельников, Ю. П. Корнюшин, А. В. Мазин

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Калужский филиал, Калуга, Россия

ПРОЕКЦИОННО-МАТРИЧНАЯ ФОРМА ОПИСАНИЯ ДИНАМИКИ ТУРБОГЕНЕРАТОРА КАК ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

В статье рассматривается проекционно-матричная форма описания динамики турбогенератора как объекта регулирования. Исходная модель синхронного генератора в d–q координатах содержит несколько нелинейных элементов, осуществляющих операцию умножения двух процессов. Авторы предлагают вычислить матричный оператор умножения двух процессов заранее, а не в процессе основной процедуры дальнейшего синтеза необходимых регуляторов. Полученная форма описания турбогенератора позволяет использовать ее для синтеза алгоритмов регулирования в детерминированной, статистической, а также робастной постановках задач современными проекционно-матричными методами. Заранее рассчитанный матричный оператор умножения двух процессов позволяет уменьшить количество итерационных процессов в алгоритмах синтеза регуляторов, что дает возможность строить более эффективные вычислительные алгоритмы в реальном времени. Авторами доказано, что к разработанной проекционно-матричной модели турбогенератора можно применить алгоритмы синтеза, которые учитывают случайный характер возмущений, неопределенность математической модели и алгоритмы идентификации.

Ключевые слова: *турбогенератор, математическая модель, матричный оператор, ортонормированный базис.*

Для цитирования: Мельников Д. В., Корнюшин Ю. П., Мазин А. В. Проекционно-матричная форма описания динамики турбогенератора как объекта регулирования // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 6–11.

D. V. Melnikov, Yu. P. Kornyushin, A. V. Mazin

Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, Kaluga, Russia

PROJECTION-MATRIX FORM OF DESCRIPTION OF DYNAMICS OF A TURBOGENERATOR AS A REGULATION OBJECT

The article deals with the projection-matrix form of description of dynamics of a turbogenerator as an object of regulation. The initial model of a synchronous generator in coordinates contains several nonlinear elements performing the operation of two processes multiplication. The authors propose to calculate the matrix multiplication operator of two processes in advance, rather than in the process of the main procedure for further synthesis of the necessary regulators. The obtained form of the description of the turbo generator makes it possible to use it for synthesis of regulation algorithms in deterministic, statistical, and also in robust formulation of problems by advanced projection-matrix methods. The pre-calculated matrix operator for multiplying of two processes makes it possible to reduce the number of iterative processes in the algorithms of regulator synthesis, which makes it possible to build more efficient computational algorithms in real time. The authors proved that synthesis algorithms can be applied to the developed projection-matrix model of the turbogenerator, and such algorithms take into account the random nature of perturbations, the uncertainty of the mathematical model and the identification algorithms.

Keywords: *turbogenerator, mathematical model, matrix operator, orthonormal basis.*

For citation: Melnikov D. V., Kornyushin Yu. P., Mazin A. V. Projection-matrix form of description of dynamics of a turbogenerator as a regulation object. Radiopromyshlennost, 2018, no. 1, pp. 6–11 (In Russian).

DOI 10.21778/2413-9599-2018-1-6-11

Задачи эффективного управления электроэнергетическими системами относятся к числу фундаментальных научно-технических проблем. Эти системы являются нелинейными, многомерными и многосвязными, функционирующими в различных режимах, в том числе и в стохастических. Решить задачу эффективного управления электроэнергетическими системами с помощью традиционных методик построения алгоритмов управления не представляется возможным в силу ряда очевидных причин [1].

В качестве основных методов для решения задач построения законов управления объектами электроэнергетических систем необходимо использовать современные методы теории автоматического управления. Одним из них являются методы, основанные на теории матричных операторов, с применением аппарата математического программирования. Матричные (проекционные) методы основаны на конечномерной аппроксимации сигналов и операторов, описывающих математические модели объектов и систем, что приводит к алгебраизации решения большинства прикладных задач в области управления. Соответственно, появляется возможность их эффективной вычислительной реализации на современных, например сигнальных, процессорах. В настоящее время проекционные методы показывают свою эффективность для исследования и при проектировании не только линейных, но и нелинейных систем управления [2]. Для того чтобы воспользоваться проекционно-матричными алгоритмами, необходимо иметь проекционно-матричную модель объекта. В этой статье приводятся основные соотношения для описания динамики турбогенератора в проекционно-матричной форме.

Турбогенераторы – неявнополюсные быстроходные электрические машины. Система уравнений напряжений в координатах d, g может быть записана следующим образом [3] (все уравнения записаны в относительных единицах, демпферная обмотка и обмотка возбуждения должны быть приведены к числу витков якоря):

$$\begin{gathered}
u_d = \frac{d\Psi_d}{dt} - \Psi_q\omega_{\text{р}} + r_a i_d;\ \Psi_d = L_d i_d + M_d i_f + M_d i_{\text{д}d};\\
u_q = \frac{d\Psi_q}{dt} + \Psi_d\omega_{\text{р}} + r_a i_q;\ \Psi_q = L_q i_q + M_q i_{\text{д}q};\\
u_f = \frac{d\Psi_f}{dt} + r_f i_f;\ \Psi_f = L_f i_f + M_d i_d + M_d i_{\text{д}d};\\
0 = \frac{d\Psi_{\text{д}d}}{dt} + r_{\text{д}d} i_{\text{д}d};\ \Psi_{\text{д}d} = L_{\text{д}d} i_{\text{д}d} + M_d i_d + M_d i_f;\\
0 = \frac{d\Psi_{\text{д}q}}{dt} + r_{\text{д}q} i_{\text{д}q};\ \Psi_{\text{д}q} = L_{\text{д}q} i_{\text{д}q} + M_q i_q,
\end{gathered} \tag{1}$$

где r_a – активное сопротивление обмотки якоря; r_f – активное сопротивление обмотки возбуждения; $r_{\text{д}d}$, $r_{\text{д}q}$ – активные сопротивления демпферной обмотки возбуждения по осям d и q; i_d и i_q – токи в обмотках якоря по продольной и поперечной осям; i_f – ток в обмотке возбуждения; $i_{\text{д}d}$, $i_{\text{д}q}$ – токи в демпферной обмотке по продольной и поперечной осям машины; ω_p – угловая скорость ротора; Ψ_x – потокосцепление обмотки x; L_d, L_d – индуктивности обмоток якоря по продольной и поперечной осям машины; L_f – индуктивность обмотки возбуждения; $L_{\text{д}d}$ и $L_{\text{д}q}$ – индуктивности демпферной обмотки по продольной и поперечной осям машины; M_d, M_d – взаимные индукции между обмотками по продольной и поперечной осям.

Уравнения (1) можно представить в форме Коши:

$$\begin{gathered}
i'_d = a_{11}i_d + a_{12}\omega_{\text{р}}i_q + a_{13}i_f + a_{14}i_{\text{д}d} + a_{15}\omega_{\text{р}}i_{\text{д}q} + g_1u_d + b_1u_f;\\
i'_q = a_{21}\omega_{\text{р}}i_d + a_{22}i_q + a_{23}\omega_{\text{р}}i_f + a_{24}\omega_{\text{р}}i_{\text{д}d} + a_{25}i_{\text{д}q} + g_2u_q;\\
i'_f = a_{31}i_d + a_{32}\omega_{\text{р}}i_q + a_{33}i_f + a_{34}i_{\text{д}d} + a_{35}\omega_{\text{р}}i_{\text{д}q} + g_3u_d + b_3u_f;\\
i'_{\text{д}d} = a_{41}i_d + a_{42}\omega_{\text{р}}i_q + a_{43}i_f + a_{44}i_{\text{д}d} + a_{45}\omega_{\text{р}}i_{\text{д}q} + g_4u_d + b_4u_f;\\
i'_{\text{д}q} = a_{51}\omega_{\text{р}}i_d + a_{52}i_q + a_{53}\omega_{\text{р}}i_f + a_{54}\omega_{\text{р}}i_{\text{д}d} + a_{55}i_{\text{д}q} + g_5u_q,
\end{gathered} \tag{2}$$

где

$$\begin{gathered}
a_{11} = \frac{-r_a\left(L_f L_{\text{д}d} - M_d^2\right)}{L_1};\ a_{12} = \frac{\left(L_f L_{\text{д}d} - M_d^2\right)L_q}{L_1};\\
a_{13} = \frac{-r_f\left(M_d^2 - M_d L_{\text{д}d}\right)}{L_1};\ a_{14} = \frac{\left(M_d L_f - M_d^2\right)r_{\text{д}d}}{L_1};\\
a_{15} = \frac{M_q\left(L_f L_{\text{д}d} - M_d^2\right)}{L_1};\ g_1 = \frac{\left(L_f L_{\text{д}d} - M_d^2\right)}{L_1};\\
b_1 = \frac{\left(M_d^2 - M_d L_{\text{д}d}\right)}{L_1};\ a_{21} = \frac{-L_{\text{д}q}L_d}{L_2};\ a_{22} = \frac{-L_{\text{д}q}r_a}{L_2};\\
a_{23} = \frac{-L_{\text{д}q}M_d}{L_2};\ a_{24} = \frac{-L_{\text{д}q}M_d}{L_2};\ a_{25} = \frac{M_q r_{\text{д}q}}{L_2};\ g_2 = \frac{L_{\text{д}q}}{L_2};\\
a_{31} = \frac{-r_a\left(M_d^2 - L_{\text{д}d}M_d\right)}{L_1};\ a_{32} = \frac{\left(M_d^2 - L_{\text{д}d}M_d\right)L_q}{L_1};\\
a_{33} = \frac{-r_f\left(L_d L_{\text{д}d} - M_d^2\right)}{L_1};\ a_{34} = \frac{\left(M_d L_d - M_d^2\right)r_{\text{д}d}}{L_1};\\
a_{35} = \frac{M_q\left(M_d^2 - L_{\text{д}d}M_d\right)}{L_1};\ g_3 = \frac{\left(M_d^2 - L_{\text{д}d}M_d\right)}{L_1};\\
b_3 = \frac{\left(L_d L_{\text{д}d} - M_d^2\right)}{L_1};\ a_{41} = \frac{-r_a\left(M_d^2 - L_f M_d\right)}{L_1};\\
a_{42} = \frac{\left(M_d^2 - L_f M_d\right)L_q}{L_1};\ a_{43} = \frac{-r_f\left(M_d^2 - M_d L_d\right)}{L_1};\\
a_{44} = \frac{\left(M_d^2 - L_d L_f\right)r_{\text{д}d}}{L_1};\ a_{45} = \frac{M_q\left(M_d^2 - L_f M_d\right)}{L_1};\\
g_4 = \frac{\left(M_d^2 - L_f M_d\right)}{L_1};\ b_4 = \frac{\left(M_d^2 - M_d L_d\right)}{L_1};
\end{gathered}$$

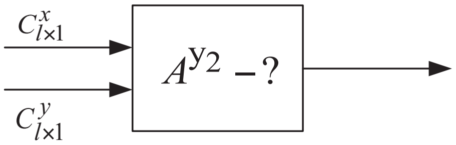

Рисунок. Вычисление матричного оператора умножения двух процессов

$$a_{51}=\frac{M_q L_d}{L_2};\ a_{52}=\frac{M_q r_a}{L_2};\ a_{53}=\frac{M_q M_d}{L_2};\ a_{54}=\frac{M_q M_d}{L_2};$$
$$a_{55}=\frac{-L_q r_{дq}}{L_2};\ g_5=\frac{-M_q}{L_2}.$$

Форма представления модели генератора в виде (2) позволяет перейти к проекционно-матричной модели генератора, используя матричные операторы интегрирования, умножения. Действительно, интегрируя левую и правую части (2) и переходя в проекционную область, получим

$$\begin{aligned}
&C^{i_d}=a_{11}A_и C^{i_d}+a_{12}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_q}\right)+a_{13}A_и C^{i_f}+\\
&+a_{14}A_и C^{i_{дd}}+a_{15}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_{дq}}\right)+g_1 A_и C^{u_d}+b_1 A_и C^{u_f};\\
&C^{i_q}=a_{21}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_d}\right)+a_{22}A_и C^{i_q}+a_{23}A_и A_{у_2}\times\\
&\times\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_f}\right)+a_{24}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_{дd}}\right)+a_{25}A_и C^{i_{дq}}+g_2 A_и C^{u_q};\\
&C^{i_f}=a_{31}A_и C^{i_d}+a_{32}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_q}\right)+a_{33}A_и C^{i_f}+\\
&+a_{34}A_и C^{i_{дd}}+a_{35}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_{дq}}\right)+g_3 A_и u_d+b_3 A_и C^{u_f};\\
&C^{i_{дd}}=a_{41}C^{i_d}+a_{42}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_q}\right)+a_{43}A_и C^{i_f}+\\
&+a_{44}C^{i_{дq}}+a_{45}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_{дq}}\right)+g_4 A_и u_d+b_4 A_и C^{u_f};\\
&C^{i_{дq}}=a_{51}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_d}\right)+A_и C^{i_q}+a_{53}A_и A_{у_2}\times\\
&\times\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_f}\right)+a_{54}A_и A_{у_2}\left(C^{\omega_р}\otimes C^{i_{дd}}\right)+a_{55}A_и C^{i_{дq}}+g_5 A_и C^{u_q},
\end{aligned}\qquad (3)$$

где C^x – проекционные характеристики соответствующего процесса; $A_и$ – матричный оператор интегрирования; $A_{у_2}$ – матричный оператор умножения двух процессов; $\otimes$ – кронекерово произведение двух векторов.

В проекционно-матричных методах анализа и синтеза систем управления используются матричные операторы сложения, интегрирования, дифференцирования, умножения на известную функцию. Операция умножения двух процессов является нелинейной операцией. Для вычисления матричного оператора этого преобразования можно воспользоваться идеей замены нелинейного звена эквивалентным матричным оператором [2]. В результате построенные алгоритмы анализа и синтеза будут содержать дополнительные итерационные процедуры [4–6]. Авторы предлагают вычислить матричный оператор умножения двух сигналов заранее, как и матричный оператор интегрирования. Представим два процесса управления $x(t)$ и $y(t)$ в виде следующих разложений:

$$x(t)=\sum_{i=1}^{l}c_i^x\varphi_i(t),\ y(t)=\sum_{j=1}^{l}c_j^y\varphi_j(t),$$

или

$$x(t)=\Phi^{\mathrm{T}}(t)C^x,\ y(t)=\Phi^{\mathrm{T}}(t)C^y,$$

где $C^x_{l\times 1}=[c_1^x\ c_2^x\ \dots\ c_l^x]^{\mathrm{T}}$, $C^y_{l\times 1}=[c_1^y\ c_2^y\ \dots\ c_l^y]^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец коэффициентов разложения; $\Phi_{l\times 1}(t)=[\varphi_1(t)\ \varphi_2(t)\ \dots\ \varphi_l(t)]^{\mathrm{T}}$ – вектор-столбец базисных функций с весом $\rho(t)$ (нижний индекс здесь и далее означает размер матрицы или вектора).

Поставим следующую задачу: найти матричный оператор, связывающий проекционные характеристики процессов $x(t)$, $y(t)$ и проекционную характеристику произведения этих процессов (см. рисунок).

С учетом (4) имеем

$$x(t)y(t)=\sum_{i=1}^{l}\sum_{j}^{l}c_i^x c_j^y\varphi_i(t)\varphi_j(t),$$
$$\int_0^T\rho(t)x(t)y(t)\varphi_z(t)dt=$$
$$=\int_0^T\sum_{i=1}^{l}\sum_{j}^{l}c_i^x c_j^y\varphi_i(t)\rho(t)\varphi_j(t)\varphi_z(t)dt,\ z=\overline{1,l},$$
$$C^{xy}_{l\times 1}=\sum_{i=1}^{l}\sum_{j}^{l}c_i^x c_j^y\int_0^T\varphi_i(t)\varphi_j(t)\varphi_z(t)dt,\ z=\overline{1,l},$$
$$C^{xy}_{l\times 1}=A^{y_2}_{l\times l^2}\left(C^x_{l\times 1}\otimes C^y_{l\times 1}\right)_{l^2\times 1},$$

где $A^{y_2}_{l\times l^2}$ – матрица умножения двух процессов, элементы которой представляют интегралы

$$I_{ijz}=\int_0^T\rho(t)\varphi_i(t)\varphi_j(t)\varphi_z(t)dt, i=\overline{1,l},\ j=\overline{1,l},\ z=\overline{1,l}.$$

Структура строки z матрицы $A^{y_2}_{l\times l^2}$ имеет следующий вид:

$$\mathbf{A}^{y_2}_{1\times l^2}(z)=\int_0^T\left[\left(\Phi(t)^{\mathrm{T}}\right)_{1\times l}\otimes\left(\Phi(t)^{\mathrm{T}}\right)_{1\times l}\right]\rho(t)\varphi_z(t)dt, z=\overline{1,l}.\qquad (4)$$

Таким образом, заранее рассчитав значения интегралов (4), можно найти матрицу умножения двух процессов. Приведем одну из реализаций вычисления матричного оператора (4) в среде MATLAB, в случае, если базис является дискретным:

```
function Ay2=m_ymn2(H)
%Операция умножения двух процессов
%в базисе функций Уолша, упорядоченных по Адамару
%H – матрица Адамара
N=length(H);
Ay2=zeros(N, N^2);
k=0;
```

```
for i=1: N
    for j=1: N
        k=k+1;
        HH=H(i,:).*H(j,:);
        Ay2(:, k)=f_yol(HH', H);
    end
```

Для построения эффективных алгоритмов синтеза объект регулирования (2) можно представить в виде

$$I'_{\text{г}} = AI_{\text{г}} + \omega A_{\omega} I_{\text{г}} + BU,$$

где

$$I_{\text{г}} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_{\text{д}d} \\ i_{\text{д}q} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} g_1 & 0 & b_1 \\ 0 & g_2 & 0 \\ g_3 & 0 & b_3 \\ g_4 & 0 & b_4 \\ 0 & g_5 & 0 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 & a_{13} & a_{14} & 0 \\ 0 & a_{22} & 0 & 0 & a_{25} \\ a_{31} & 0 & a_{33} & a_{34} & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & a_{44} & 0 \\ 0 & a_{52} & 0 & 0 & a_{55} \end{bmatrix},$$

$$A_{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & a_{12} & 0 & 0 & a_{15} \\ a_{21} & 0 & a_{23} & a_{24} & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 & a_{35} \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 & a_{45} \\ a_{51} & 0 & a_{53} & a_{54} & 0 \end{bmatrix}.$$

Тогда систему нелинейных алгебраических уравнений (3) можно записать следующим образом:

$$C^{I_{\text{г}}} = (A \otimes A_{\text{и}}) C^{I_{\text{г}}} + \\ +(A_{\omega} \otimes A_{\text{и}})\left(I_{5\times5} \otimes A_{\text{у}_2}\right)\left(C^{I_{\text{г}}} \otimes C^{\omega}\right) + (B \otimes A_{\text{и}}) C^{U}, \quad (5)$$

где I_{5x5} – единичная матрица размера 5x5, или

$$C^{I_{\text{г}}} = \begin{bmatrix} C^{i_d} \\ C^{i_q} \\ C^{i_f} \\ C^{i_{\text{д}d}} \\ C^{i_{\text{д}q}} \end{bmatrix}, C^{U} = \begin{bmatrix} C^{u_d} \\ C^{u_q} \\ C^{u_f} \end{bmatrix}.$$

Уравнения (5) описывают динамику электрической части турбогенератора как объекта регулирования в проекционно-матричной форме.

Модель приводного механизма генератора, в качестве которого выступает турбина, должна включать в себя механическую часть синхронного генератора, так как они вращаются как единое жесткое тело. Уравнение движения традиционно записывается в виде

$$Jp\frac{d\omega_{\text{р}}}{dt} = M_{\text{т}} - M_{\text{эм}}, \quad (6)$$

где J – момент инерции; p – число пар полюсов генератора; $M_{\text{т}}$ – момент турбины; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент синхронного генератора. Следует отметить, что $M_{\text{эм}}$ определяется через произведения соответствующих токов $M_{\text{эл}} = M\left(i_f i_q + i_q i_{\text{д}d} - i_d i_{\text{д}q}\right)$ ($M = M_d = M_q$ в случае, если генератор неявнополюсный) [3], поэтому для вычисления проекционной характеристики электромагнитного момента $C^{M_{\text{эм}}}$ необходимо воспользоваться матричным оператором произведения двух процессов:

$$C^{M_{\text{эл}}} = MA_{\text{у}_2}\left(C^{i_f} \otimes C^{i_q} + C^{i_q} \otimes C^{i_{\text{д}d}} - C^{i_d} \otimes C^{i_{\text{д}d}}\right).$$

Тогда уравнение ротора в проекционной форме можно представить в виде

$$C^{\omega_{\text{р}}} = \frac{1}{Jp} A_{\text{и}}\left(C^{M_{\text{т}}} - C^{M_{\text{эл}}}\right). \quad (7)$$

где $C^{\omega_{\text{р}}}$, $C^{M_{\text{т}}}$ – проекционные характеристики частоты вращения и момента турбины.

К проекционно-матричной модели турбогенератора (5, 7) можно применить алгоритмы синтеза, учитывающие случайный характер возмущений [7, 8], неопределенность математической модели [9–11], а также алгоритмы идентификации [12, 13].

Заключение

Полученная в работе форма описания динамики турбогенератора позволяет решать задачи синтеза алгоритмов регулирования в детерминированной, статистической и робастной постановках задач современными проекционно-матричными методами. Матричный оператор умножения двух процессов позволяет существенно сократить количество итерационных процессов в алгоритмах синтеза регуляторов, а значит и строить более эффективные вычислительные алгоритмы в реальном времени с использованием сигнальных процессоров.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и Правительства Калужской области (грант № 16–41–400701).

ACKNOWLEDGEMENT

The work was performed with the support of the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Kaluga region (grant no. 16–41–400701).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синергетические методы управления сложными системами. Энергетические системы / под ред. А. А. Колесникова; 2-е изд. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 248 с.
2. Матричные методы расчета и проектирования сложных систем автоматического управления для инженеров / К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, Ю. Л. Лукашенко, Д. В. Мельников, В. М. Рыбин, А. И. Трофимов; под ред. К. А. Пупкова и Н. Д. Егупова. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. 664 с.
3. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин: учебник для вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.
4. 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.
5. Применение метода матричных операторов для решения задач синтеза регуляторов в системах управления летательными аппаратами / Е. Л. Межирицкий, К. А. Пупков, Н. Д. Егупов, В. М. Никифоров, С. В. Орлов / Труды ФГУП НПЦАП // Системы и приборы управления. 2011. № 4. С. 14–33.
6. Окар Мин. Алгоритм расчета нелинейных систем управления проекционно-матричным методом // Инженерный журнал: наука и инновации. 2014. № 12. С. 17–22. URL: http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1268.html. (дата обращения: 10.10.2017)
7. Серегина Е. В., Степович М. А., Макаренков А. М. Об одной возможности статистического анализа распределения неосновных носителей заряда, генерированных электромагнитным излучением в полупроводниковом материале // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 24–31.
8. Серегина Е. В., Макаренков А. М., Степович М. А. Статистический анализ модели коллективного движения неосновных носителей заряда с использованием проекционного метода // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2012. № 4. С. 47.
9. Егупов Н. Д. Синтез систем регулирования энергетических турбин в условиях параметрической неопределенности // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 5–1. С. 108–113.
10. Рогоза А. А. Проекционно-матричный подход к синтезу робастного управления для линейных систем с интервальными параметрами // Информатика и системы управления. 2014, no. 2 (40), pp. 147–157.
11. Трофимов М. А., Рогоза А. А. Алгоритм синтеза робастных регуляторов для нелинейных систем с параметрической неопределенностью, основанный на проекционно-матричных методах // Научно-технический вестник Поволжья. 2013. № 4. С. 244–246.
12. Макаренков А. М. Применение усредненных проекционных моделей для идентификации параметров стохастических систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2011. № 5–1. С. 143–147.
13. Макаренков А. М., Аунг Ч. С. Идентификация случайных параметров моделей систем автоматического управления // Научное обозрение. 2015. № 2. С. 69–79.

REFERENCES

1. *Sinergeticheskie metody upravlenija slozhnymi sistemami. Jenergeticheskie sistemy* [Synergetic methods for managing complex systems. Power systems]. In: A. A. Kolesnikov, ed; 2-e izd. Moscow, Knizhny dom LIBROKOM Publ., 2013, 248 p. (In Russian).
2. Pupkov K. A., Egupov N. D., Lukashenko Yu. L., Melnikov D. V., Rybin V. M., Trofimov A. I. *Matrichnye metody rascheta i proektirovanija slozhnyh sistem avtomaticheskogo upravlenija dlja inzhenerov* [Matrix methods for calculating and designing complex automatic control systems for engineers]. In: K. A. Pupkov, N. D. Egupov, ed. Moscow, Izdatelstvo MGTU im. N. E. Baumana Publ., 2007, 664 p. (In Russian).
3. Kopylov I. P. *Matematicheskoe modelirovanie jelektricheskih mashin* [Mathematical modeling of electrical machines]. Uchebnik dlya vuzov. 3-e izd., pererab. i dop. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 327 p. (In Russian).
4. Melnikov D. V. Projection-matrix method for synthesizing a loop for regulating the rotor speed of a steam turbine. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya «Mashinostroenie»,* 2013, no. 4 (93), pp. 43–53 (In Russian).
5. Mezhiritskiy E. L., Pupkov K. A., Egupov N. D., Nikiforov V. M., Orlov S. V. Application of the method of matrix operators for solving the problems of synthesis of regulators in control systems of aircrafts. *Trudy FGUP NPCAP. Sistemy i pribory upravleniya,* 2011, no. 4, pp. 14–33 (In Russian).
6. Okar Min. [Algorithm for calculating nonlinear control systems by the projection-matrix method]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii,* 2014, no. 12, pp. 17–22 (In Russian). Available at: http://engjournal.ru/catalog/it/asu/1268.html (accessed 10.10.2017)
7. Seregina E. V., Stepovich M. A., Makarenkov A. M. On a possibility of statistical analysis of the distribution of minority charge carriers generated by electromagnetic radiation in a semiconductor material. *Prikladnaya fizika,* 2012, no. 3, pp. 24–31 (In Russian).
8. Seregina E. V., Makarenkov A. M., Stepovich M. A. Statistical analysis of the model of collective motion of minority charge carriers with the use of projection method. *Poverhnost. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neytronnye issledovaniya,* 2012, no. 4, p. 47 (In Russian).

9. Egupov N.D. Synthesis of energy turbine regulation systems under conditions of parametric uncertainty. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki,* 2011, no. 5–1, pp. 108–113 (In Russian).
10. Rogoza A. Projection-matrix approach to robust control synthesis for linear systems with interval parameters. *Informatika i sistemy upravleniya,* 2014, no. 2 (40), pp. 147–157 (In Russian).
11. Trofimov M.A., Rogoza A.A. Projection-matrix methods-based algorithm of the synthesis of robust regulators for nonlinear systems with parametric uncertainty. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzhya,* 2013, no. 4, pp. 244–246 (In Russian).
12. Makarenkov A.M. Application of averaged projection models for identification of parameters of stochastic systems. *Izvestiya Tulskogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki,* 2011, no. 5–1, pp. 143–147 (In Russian).
13. Makarenkov A.M., Aung Ch.S. Identification of random parameters of models of automatic control systems. *Nauchnoe obozrenie,* 2015, no. 2, pp. 69–79 (In Russian).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мельников Дмитрий Владимирович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Электротехника», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, 248000, Калуга, ул. Баженова, д. 2, тел.: 8 (920) 613-85-74, 8 (4842) 77-45-11, e-mail: melnikov-dv@yandex.ru.
Корнюшин Юрий Петрович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Системы автоматического управления», Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, 248000, Калуга, ул. Баженова, д. 2, тел.: 8 (906) 813-28-19, 8 (4842) 54-78-36, e-mail: theroland@yandex.ru.
Мазин Анатолий Викторович, д.т.н., профессор, зав. кафедрой ЭИУ6-КФ, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал, 248000, Калуга, ул. Баженова, д. 2, тел.: 8 (910) 915-58-25, e-mail: mazinav@yandex.ru.

AUTHORS

Melnikov Dmitriy, PhD, associate professor, head of Department of Electrical engineering, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, 2, ulitsa Bazhenova, Kaluga, 248000, Russian Federation, tel.: +7 (920) 613-85-74, +7 (4842) 77-45-11, e-mail: melnikov-dv@yandex.ru.
Kornyushin Yuriy, Dr., professor, head of Department of Automatic control systems, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, 2, ulitsa Bazhenova, Kaluga, 248000, Russian Federation, tel.: +7 (906) 813-28-19, +7 (4842) 54-78-36, e-mail: theroland@yandex.ru.
Mazin Anatoliy, PhD, professor, head of the Department EIU6-KF, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga branch, 2, ulitsa Bazhenova, Kaluga, 248000, Russian Federation, tel.: +7 (910) 915-58-25, e-mail: mazinav@yandex.ru.