УДК 512:517.962:62.50
DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-302-310

# АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ПРОЦЕССОВ В ДИСКРЕТНЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ МНОГОКАНАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ

А. С. Павлов, А. В. Ушаков

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия*
*E-mail: ushakov-avg@yandex.ru*

Представлен способ анализа качества процессов в дискретных нестационарных многоканальных системах при равных интервалах дискретности сепаратных каналов на основе использования возможностей сингулярного разложения. Способ позволяет строить скалярные оценки векторных процессов. Продемонстрирована возможность оценки качества функционирования таких систем в форме мажорантных и минорантных оценок общепринятых показателей качества. Рассмотрены многоканальные нестационарные дискретные системы с единым интервалом дискретности для всех сепаратных каналов. Скаляризация процессов в системах осуществлена с использованием сингулярного разложения критериальных матриц, конструируемых для векторного ступенчатого и векторного одночастотного гармонического воздействия. Алгоритмическое обеспечение построено с учетом специфики дискретной природы нестационарных многоканальных систем, при этом использовано матричное уравнение Сильвестра с переменными матричными компонентами.

***Ключевые слова:*** *многоканальные системы, нестационарные дискретные системы, сепаратные каналы, равные интервалы дискретности, сингулярное разложение, скалярные оценки качества процессов*

**Введение.** Важными свойствами системы управления являются устойчивость, гарантирующая работоспособность системы, и робастность, гарантирующая стабильность ее качества. В этой связи встает задача анализа качественных показателей проектируемой системы. При работе с системами, обладающими векторным входом и выходом, данная задача усложняется. Наиболее удобно решать такую задачу путем скаляризации и последующей оценки скалярной величины. Наиболее употребляемой скаляризирующей функцией является норма, а одним из методов анализа — последующее эллипсоидное покрытие векторных процессов. Одно из решений задачи оценки с применением эллипсоидных оценок было предложено в работе [1], оценке качества линейных многомерных систем посвящены работы [2, 3].

Не только метод эллипсоидных оценок может использоваться при анализе многомерных систем. Так, например, для случая дискретных систем можно воспользоваться менее удобным методом сравнения [4]. Некоторые авторы используют для анализа дискретных систем переход к непрерывному времени [5], однако он неудобен в вычислительном плане.

В связи со сказанным следует обратить внимание на работы [6—8]. В [8] сформирована наиболее удобная алгоритмическая база определения устойчивости и робастности систем с периодическими ограничениями, являющихся частным случаем нестационарных систем.

К более сложному случаю относятся многоканальные и нестационарные дискретные системы. В работе [9] авторы ограничились случаем использования канонической фробениусовой структуры представления матриц нестационарной дискретной системой с нелинейной частью, что неудобно при работе с многоканальными системами. Предлагаемый в [10] способ анализа нестационарной дискретной системы малопригоден для оценки качества системы при произвольном внешнем воздействии. Альтернативный способ нахождения области возможных состояний [11] также не позволяет корректно оценить качество системы.

Для нестационарных дискретных систем не сформирована алгоритмическая база, позволяющая специалистам по их эксплуатации эффективно и наглядно определять основные показатели качества векторных процессов. Эта задача ставится и решается в настоящей статье с использованием возможностей сингулярного разложения для анализа векторных процессов.

**Формирование критериальных матриц дискретных нестационарных многоканальных систем для случая конечномерных экзогенных воздействий.** Рассматривается дискретная нестационарная многоканальная система вида:

$$x(k+1)=F(k)x(k)+G(k)g(k), x(0)=x(k)\big|_{k=0};$$
$$y(k)=C(k)x(k), \tag{1}$$

где $F(k)\in R^{n\times n}$ — матрица состояния, $G(k)\in R^{n\times m}$ — матрица входов, $C(k)\in R^{m\times n}$ — матрица выходов, $g(k)\in R^{m}$ — векторное задающее воздействие, $y(k)\in R^{m}$ — векторный выход, $x(k)\in R^{n}$ — вектор состояния, $k$ — дискретное время, выраженное в числе интервалов дискретности длительности $\Delta t$.

Пусть задающее конечномерное экзогенное воздействие сформировано автономной дискретной системой:

$$z(k+1)=Ez(k), z(0)=z(k)\big|_{k=0};$$
$$g(k)=Pz(k), \tag{2}$$

где $E$ — матрица состояния, $P$ — матрица выходов, $g(k)$ — векторный выход, $z(k)$ — вектор состояния.

Поставим задачу: найти полное явное решение системы (1) для случая конечномерного задающего воздействия с целью дальнейшего формирования на этом решении критериальных матриц системы, используемых для сингулярного разложения.

Тогда агрегированная система, полученная объединением (1) и (2) с вектором состояния $\tilde{x}(k)=\begin{bmatrix} x(k)\\ z(k)\end{bmatrix}$, становится автономной:

$$\tilde{x}(k+1)=\begin{bmatrix} F(k)x(k)+G(k)Pz(k)\\ 0x(k)+Ez(k)\end{bmatrix}=\tilde{F}(k)\tilde{x}(k), \tilde{x}(0)=\tilde{x}(k)\big|_{k=0}, \tag{3}$$

где

$$\tilde{F}(k)=\begin{bmatrix} F(k) & G(k)P\\ 0 & E\end{bmatrix}. \tag{4}$$

Найдем свободное движение [12] агрегированной дискретной системы (3). Введем в рассмотрение матричную функцию $f(*)$ от матрицы $(*)$:

$$f\left(*\right)=a_0 I+a_1(*)+a_2\left(*\right)^2+a_3\left(*\right)^3+\ldots, a_i\in R, i=\overline{1,\infty}. \tag{5}$$

Тогда становится справедливым следующее утверждение.

*Утверждение 1.* Если для любого $k\geq 0$ существует матрица преобразования подобия $T(k)$, удовлетворяющая уравнению Сильвестра:

$$T(k)E-F(k)T(k)=G(k)P, \tag{6}$$

то матричная функция $f\left(\tilde{F}(k)\right)$ (5) при $\tilde{F}(k)$ вида (4) сводится к

$$f\left(\tilde{F}(k)\right)=\begin{bmatrix} f\left(F(k)\right) & T(k)f\left(E\right)-f\left(F(k)\right)T(k)\\ 0 & f\left(E\right)\end{bmatrix}. \tag{7}$$ □

*Доказательство.* Пусть для каждого фиксированного $k \ge 0$ $f\left(\tilde{F}\right)$ может быть представлена бесконечным матричным рядом

$$f\left(\tilde{F}\right) = a_0 I + a_1 \tilde{F} + a_2 \tilde{F}^2 + a_3 \tilde{F}^3 + \ldots, a_i \in R, i = \overline{1,\infty}, \tag{8}$$

тогда с учетом (6)

$$f\left(\tilde{F}\right) = a_0 I + a_1 \tilde{F} + a_2 \tilde{F}^2 + a_3 \tilde{F}^3 + \ldots =$$

$$= a_0 I + a_1 \begin{bmatrix} F & TE - FT \\ 0 & E \end{bmatrix} + a_2 \begin{bmatrix} F^2 & TE^2 - F^2 T \\ 0 & E^2 \end{bmatrix} + a_3 \begin{bmatrix} F^3 & TE^3 - F^3 T \\ 0 & E^3 \end{bmatrix} + \ldots =$$

$$= \begin{bmatrix} a_0 I + a_1 F + a_2 F^2 + \ldots & \left(a_0 T + a_1 TE + a_2 TE^2 + \ldots\right) - \left(a_0 T + a_1 FT + a_2 F^2 T + \ldots\right) \\ 0 & a_0 I + a_1 E + a_2 E^2 + \ldots \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} f\left(F\right) & Tf\left(E\right) - f\left(F\right)T \\ 0 & f\left(E\right) \end{bmatrix}. \tag{9}$$ ■

В качестве матричной функции (8) будет выступать фундаментальная матрица системы, позволяющая связать вектор состояния свободного движения с вектором начальных условий. Для стационарного случая матричная функция принимает вид

$$f(\tilde{F}) = \tilde{F}^k, \; k \ge 0, \tag{10}$$

для нестационарного случая выражение (10) преобразуется в

$$f(\tilde{F}(k)) = \prod_{i=0}^{k-1} \tilde{F}(i), k \ge 0. \tag{11}$$

С учетом (7) и (11) свободное движение дискретной системы (3) может быть представлено как

$$\tilde{x}(k) = f\left(\tilde{F}(k)\right)\tilde{x}(0) = \begin{bmatrix} f\left(F(k)\right) & T(k-1)f\left(E\right) - f\left(F(k)\right)T(k-1) \\ 0 & f\left(E\right) \end{bmatrix}\tilde{x}(0) =$$

$$= \begin{bmatrix} \prod_{i=0}^{k-1} F(i) & T(k)E^k - \left(\prod_{i=0}^{k-1} F(i)\right)T(k) \\ 0 & E^k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ z(0) \end{bmatrix}, \tag{12}$$

откуда для состояний исходной (1) и автономной систем (2):

$$\begin{gathered} x(k) = \left(\prod_{i=0}^{k-1} F(i)\right)x(0) + \left(T(k)E^k - \left(\prod_{i=0}^{k-1} F(i)\right)T(k)\right)z(0), \\ z(k) = E^k z(0). \end{gathered} \tag{13}$$

Ошибка воспроизведения задающего воздействия описывается выражением:

$$e(k) = g(k) - y(k) = Pz(k) - C(k)x(k) =$$

$$= \left(P - C(k)T(k)\right)E^k z(0) - C(k)\left(\prod_{i=0}^{k-1} \tilde{F}(i)\right)\left(x(0) - T(k)z(0)\right). \tag{14}$$

На основании (13) и (14) возможно построить критериальные матрицы дискретной нестационарной многоканальной системы (3) для типовых конечномерных экзогенных воздействий.

Для оценки динамических свойств систем в переходном режиме наиболее часто используется ступенчатое воздействие, для исследования систем в вынужденном режиме с применением амплитудно-частотных характеристик — гармоническое. Так, для ступенчатого экзогенного воздействия [13] система при $x(0)=0$ описывается следующим образом:

$$\begin{aligned} x(k) &= H_x(k)z(0); \\ y(k) &= H_y(k)z(0), \end{aligned} \tag{15}$$

где $H_x(k)=(I-\prod_{i=0}^{k-1}F(i))\left(I-F(k)\right)^{-1}G(k)$ и $H_y(k)=C(k)H_x(k)$ — критериальные матрицы, переходные по состоянию и выходу.

Однако при анализе переходных характеристик бывает необходимо учитывать ненулевые начальные условия системы, например, при использовании наблюдающих устройств в структуре регулятора и с целью оценки качества запуска системы. В этом случае выражение (15) преобразуется в:

$$\begin{aligned} x(k) &= H_{\tilde{x}}(k)\tilde{x}(0); \\ y(k) &= H_{\tilde{y}}(k)\tilde{x}(0), \end{aligned} \tag{16}$$

где $H_{\tilde{x}}(k)=\left[\prod_{i=0}^{k-1}F(i) \quad (I-\prod_{i=0}^{k-1}F(i))\left(I-F(k)\right)^{-1}G(k)\right]$, $H_{\tilde{y}}(k)=C(k)H_{\tilde{x}}(k)$.

Для случая одночастотного гармонического воздействия с частотой $\omega$ матрица подобия [13] задается в виде

$$T(\omega,k)=(I-2F(k)\cos\left(\omega\Delta t\right)+F(k)^2)^{-1}\Omega(\omega,k), \tag{17}$$

где $\Omega(\omega,k)=\left[\left(\cos\left(\omega\Delta t\right)I-F(k)\right)G(k)\vdots\ \ -\sin(\omega\Delta t)G(k)\right]$.

Выход системы и ошибка в установившемся режиме системы составляют

$$y(\omega,k)=C(k)T\left(\omega,k\right)z(k,\omega)=C(k)T\left(\omega,k\right)E^k\left(\omega\right)z(0), \tag{18}$$

$$e(\omega,k)=(P-C(k)T\left(\omega,k\right))z(k,\omega)=(P-C(k)T\left(\omega,k\right))E^k\left(\omega\right)z(0), \tag{19}$$

где

$$E=\left[\operatorname{diag}\left\{\begin{bmatrix}\cos(\omega_j\Delta t)\\ -\sin(\omega_j\Delta t)\end{bmatrix};\omega_j=\omega, j=\overline{1,m}\right\} \quad \operatorname{diag}\left\{\begin{bmatrix}\sin(\omega_j\Delta t)\\ \cos(\omega_j\Delta t)\end{bmatrix};\omega_j=\omega, j=\overline{1,m}\right\}\right],$$

$$P=\left[I_{m\times m} \quad 0_{m\times m}\right].$$

Нетрудно заметить, что выражение (18) задает матричную параметрическую [14] амплитудно-частотную характеристику нестационарной системы.

**Формирование эллипсоидных оценок качества векторных процессов с использованием сингулярного разложения.** Наиболее прост и эффективен для работы с векторными процессами метод скаляризации, основанный на использовании сингулярного разложения [15]. Для его использования необходимо прийти к линейной алгебраической задаче

$$\eta(k)=N(k)\chi(k), \tag{20}$$

где $N(k)$ — критериальная матрица, $\eta(k)$ и $\chi(k)$ — выходной и преобразуемый векторы.

Переходя в (20) к евклидовым нормам, получим оценочное неравенство вида:

$$\alpha_{\min}\left\{N(k)\right\}\le\frac{\|\eta(k)\|}{\|\chi(k)\|}\le\alpha_{\max}\left\{N(k)\right\},\forall k, \tag{21}$$

где $\alpha_{\min}$ и $\alpha_{\max}$ — максимальное и минимальное сингулярные числа матрицы $N(k)$.

Учитывая (20) и (21), возможно построить мажоранту и миноранту исследуемой векторной характеристики векторных процессов.

Применив (21) к (15) и (16), получим оценку процессов в нестационарной многоканальной дискретной системе для ступенчатого векторного воздействия:

$$\alpha_{\min}\left\{H_y(k)\right\} \le \frac{\|y(k)\|}{\|z(0)\|} \le \alpha_{\max}\left\{H_y(k)\right\}, \tag{22}$$

$$\alpha_{\min}\left\{H_{\tilde{y}}(k)\right\} \le \frac{\|y(k)\|}{\|\tilde{x}(0)\|} \le \alpha_{\max}\left\{H_{\tilde{y}}(k)\right\}, \tag{23}$$

где

$$H_y(k) = C(k)(I - \prod_{i=0}^{k-1} F(i))\left(I - F(k)\right)^{-1} G(k),$$

$$H_{\tilde{x}}(k) = C(k)\left[\prod_{i=0}^{k-1} F(i) \quad (I - \prod_{i=0}^{k-1} F(i))\left(I - F(k)\right)^{-1} G(k)\right].$$

Аналогично строится зависимость выхода системы (18) и ошибки (19) от частоты гармонического воздействия и времени:

$$\alpha_{\min}\left\{H_y(\omega,k)\right\} \le \frac{\|y(\omega,k)\|}{\|z(0)\|} \le \alpha_{\max}\left\{H_y(\omega,k)\right\}, \tag{24}$$

$$\alpha_{\min}\left\{H_e(\omega,k)\right\} \le \frac{\|e(\omega,k)\|}{\|z(0)\|} \le \alpha_{\max}\left\{H_e(\omega,k)\right\}, \tag{25}$$

где $H_y(\omega,k) = C(k)T\left(\omega,k\right)$ и $H_e(\omega,k) = (P - C(k)T\left(\omega,k\right))$, а матрица подобия задана выражением (17).

Стоит отметить, что $E^k(\omega)$ является ортогональной матрицей и умножение на нее не влияет [16] на сингулярные числа критериальных матриц, вследствие чего при использовании аппарата сингулярных чисел ее можно изъять.

Оценки (24) и (25) можно свести к зависимости от одной переменной (частоты), но для этого следует вычислять выражения (24), (25) до некоторого $k = k_{\text{fin}}$, при условии отсутствия расходимости после $k_{\text{fin}}$:

$$\min_k\left\{\alpha_{\min}\left\{H_y(\omega,k)\right\}\right\} \le \frac{\|y(\omega,k)\|}{\|z(0)\|} \le \max_k\left\{\alpha_{\max}\left\{H_y(\omega,k)\right\}\right\}, \forall k, \tag{26}$$

$$\min_k\left\{\alpha_{\min}\left\{H_e(\omega,k)\right\}\right\} \le \frac{\|e(\omega,k)\|}{\|z(0)\|} \le \max_k\left\{\alpha_{\max}\left\{H_e(\omega,k)\right\}\right\}, \forall k. \tag{27}$$

**Пример.** Рассмотрим простую трехканальную нестационарную дискретную систему с интервалом дискретности $\Delta t = 0{,}01$. Система обладает тремя каналами, отрабатывающими задающие воздействия $g_i, i = \overline{1,3}$, с передаточными функциями вида:

$$\Phi_1(z) = \frac{1{,}32\cdot 10^{-6} z^2 + 5{,}228\cdot 10^{-6} z + 1{,}294\cdot 10^{-6}}{z^3 - 2{,}96 z^2 + 2{,}921 z - 0{,}9608};$$

$$\Phi_2(z) = \frac{3{,}493\cdot 10^{-5} z^2 + 1{,}356\cdot 10^{-4} z + 3{,}29\cdot 10^{-5}}{z^3 - 2{,}881 z^2 + 2{,}768 z - 0{,}8869};$$

$$\Phi_3(z) = \frac{8{,}88\cdot 10^{-4} z^2 + 3{,}245\cdot 10^{-3} z + 7{,}418\cdot 10^{-4}}{z^3 - 2{,}649 z^2 + 2{,}352 z - 0{,}6977}.$$

Длительность переходных процессов в сепаратных каналах соответственно составляет $t_1 = 4$, $t_2 = 1{,}33$, $t_3 = 0{,}44$ с.

Между каналами присутствуют нестационарные связи, представляемые периодическими коэффициентами:

$$\gamma_i(k) = 0{,}5\left(\overline{K}_i\left(1+q_i(k)\right)+\underline{K}_i\left(1-q_i(k)\right)\right),\ i=\overline{1,4};$$

$$q_i(k) = \sin\left(2\pi k\frac{1}{N_i}\right),\ i=\overline{1,4},$$

где $\overline{K}_1 = \overline{K}_4 = 0{,}1$, $\overline{K}_2 = -0{,}01$, $\overline{K}_3 = -0{,}03$, $\underline{K}_1 = -0{,}15$, $\underline{K}_2 = \underline{K}_3 = -0{,}02$, $\underline{K}_4 = -0{,}05$, $N_1 = N_2 = 300$, $N_3 = 200$, $N_4 = 100$.

На рис. 1 приведена функциональная схема трехканальной нестационарной дискретной системы: $g_i(k), i=\overline{1,3}$, — задающие воздействия каналов; $y_i(k), i=\overline{1,3}$, — выходы каналов; $\Phi_i(z), i=\overline{1,3}$, — передаточные функции каналов; $\gamma_i(k), i=\overline{1,4}$, — периодические коэффициенты межканальных связей.

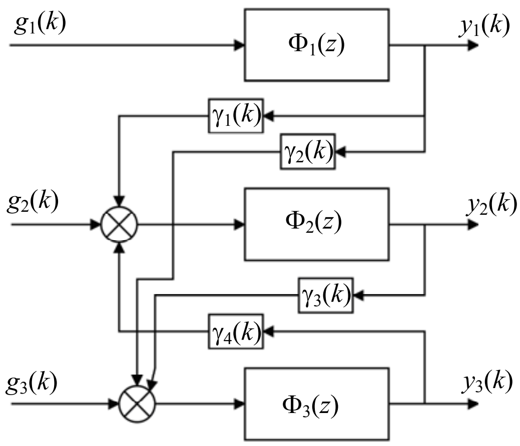


*Рис. 1*

Построим зависимости согласно (22), (23) и (26), (27).

На рис. 2 приведены мажоранта и миноранта эллипсоидного покрытия переходных процессов: *а* — с нулевыми начальными условиями системы; *б* — с учетом ненулевых начальных условий.

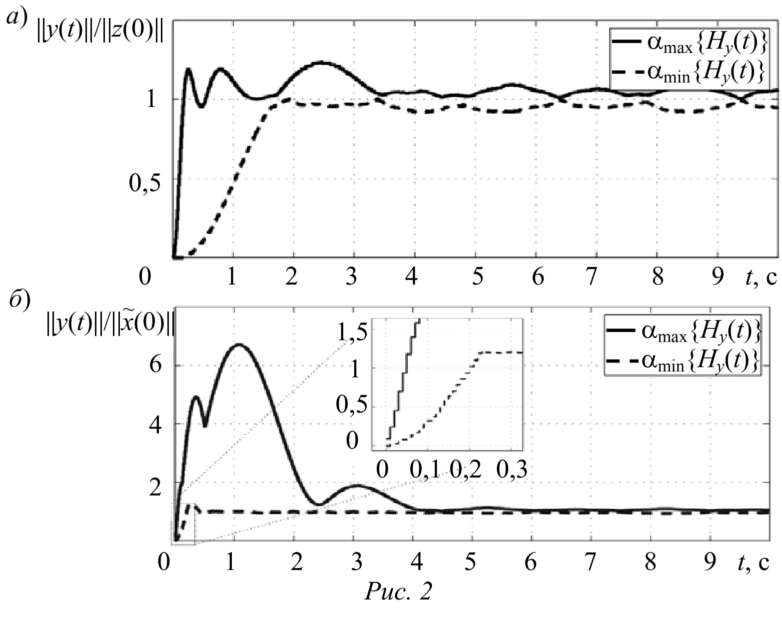


*Рис. 2*

На рис. 3 представлены мажоранта и миноранта эллипсоидного покрытия ошибки при гармоническом воздействии.

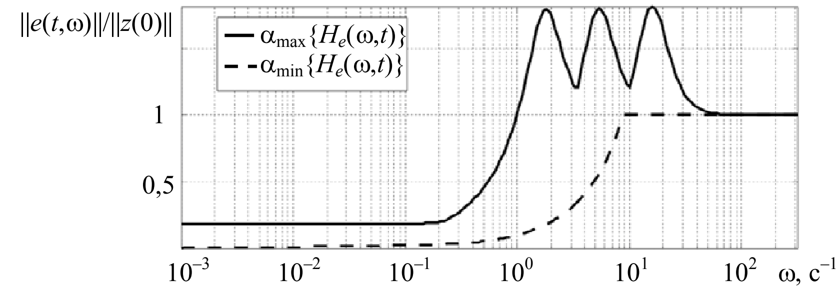


*Рис. 3*

На рис. 4 приведены мажоранта и миноранта амплитудно-частотной характеристики.

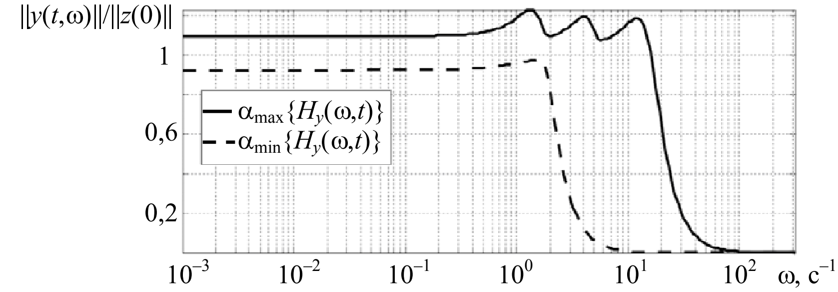


*Рис. 4*

По полученным результатам можно дать следующие оценки:

— система имеет гарантированное перерегулирование в диапазоне 0—20 %;

— время переходных процессов 1,3—3,5 с;

— система обладает статизмом в диапазоне 0—5 %;

— полоса пропускания на уровне 0,707 находится в диапазоне 1,2—18 $с^{-1}$;

— полоса пропускания на уровне 0,05 находится в диапазоне 5—46,1 $с^{-1}$;

— полоса пропускания на уровне 0,18 относительной частотной ошибки находится в диапазоне 0,3—1,1 $с^{-1}$.

**Заключение.** Представлен способ анализа качества процессов в дискретных нестационарных многоканальных системах при равных интервалах дискретности сепаратных каналов на основе использования возможностей сингулярного разложения. Способ позволяет строить скалярные оценки векторных процессов. Продемонстрирована возможность оценки качества функционирования таких систем в форме мажорантных и минорантных оценок общепринятых показателей качества.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и Министерства образования и науки РФ (проект 14.Z50.31.0031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. *Черноусько Ф. Л., Овсеевич А. П., Клепфиш Б. Р., Трущенков В. Л.* Эллипсоидное оценивание состояния управляемых динамических систем // Препринт № 224. М.: Ин-т проблем механики АН СССР, 1983.

2. *Ушаков А. В.* Модальные оценки качества процессов в линейных многомерных системах при внешних конечномерных воздействиях // Автоматика и телемеханика. 1992. № 11. С. 72—82.

3. *Ушаков А. В.* Модальные оценки качества процессов управления многомерными системами при гармоническом внешнем воздействии // Автоматика и телемеханика. 1989. № 11. С. 76—85.

4. *Григорьев В. В., Коровьяков А. Н.* Исследование качества многосвязных дискретных систем на основе метода сравнения // Автоматика и телемеханика. 1988. № 9. С. 58—66.

5. *Розенвассер Е. Н.* Математическое описание и анализ многомерных импульсных систем в непрерывном времени. I. Параметрическая передаточная функция и весовая функция многомерных импульсных систем // Автоматика и телемеханика. 1995. № 4. С. 88—105.
6. *Джури Э. И., Премаратне К., Эканайаке М. М.* Робастная абсолютная устойчивость дискретных систем // Автоматика и телемеханика. 1999. № 3. С. 97—118.
7. *Джури Э. И.* Робастность дискретных систем // Автоматика и телемеханика. 1990. № 5. С. 3—28.
8. *Морозов М. В.* Робастная устойчивость дискретных систем управления с периодическими интервальными ограничениями // Проблемы управления. 2013. № 4. С. 11—15.
9. *Кунцевич В. М.* Анализ устойчивости и синтез устойчивых систем управления одним классом нелинейных нестационарных систем // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2006. Т. 12, № 2. С. 98—107.
10. *Кузнецов В. П., Саликов Л. М.* К оценке свободных колебаний в линейных дискретных нестационарных системах // Автоматика и телемеханика. 1973. № 9. С. 176—179.
11. *Булеков В. П., Диканова Л. С.* Область возможных состояний линейной дискретной нестационарной системы // Автоматика и телемеханика. 1974. № 11. С. 57—64.
12. *Бесекерский В. А.* Цифровые автоматические системы. М.: Наука, 1976. 576 с.
13. *Дударенко Н. А., Нуйя О. С., Сержантова М. В., Слита О. В., Ушаков А. В.* Математические основы теории систем: лекционный курс и практикум. СПб: НИУ ИТМО, 2014. 292 с.
14. Теория автоматического регулирования. Кн. 3. Ч. 1. Техническая кибернетика. Теория нестационарных, нелинейных и самонастраивающихся систем автоматического регулирования / Под ред. *В. В. Солодовникова*. М.: Машиностроение, 1969. 608 с.
15. *Forsythe G. E., Malcolm M. A., Moler C. B.* Computer methods for mathematical computations. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1977. 270 p.
16. *Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А.* Матрицы и вычисления. М.: Наука, 1984. 320 с.



***Сведения об авторах***

***Андрей Сергеевич Павлов*** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.s.pavlov@email.su

***Анатолий Владимирович Ушаков*** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: ushakov-avg@yandex.ru



Рекомендована кафедрой систем управления и информатики

Поступила в редакцию 15.11.16 г.

**Ссылка для цитирования:** *Павлов А. С., Ушаков А. В.* Анализ качества процессов в дискретных нестационарных многоканальных системах // Изв. вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 4. С. 302—310.


**ANALYSIS OF PROCESS QUALITY IN TIME-VARIANT DISCRETE MULTICHANNEL SYSTEMS**


**A. S. Pavlov, A. V. Ushakov**

*ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia*
*E-mail: ushakov-avg@yandex.ru*



Time-variant discrete multiple-input multiple-output systems with a regular discrete time intervals of separate channels are considered. A method of analysis of process quality in such systems is presented. Scalar evaluation of the vector processes in the systems are realized by singular value decomposition of special matrices. The method feasibility in evaluation of the system performance is demonstrated by majorant and minorant estimates of generally accepted indicators of quality. Algorithmic maintenance using Sylvester matrix equation with variable matrix components is constructed with the account of the discrete nature of the time-variant multiple-input multiple-output systems.



**Keywords:** multichannel systems, time-variant discrete systems, separate channels, regular discrete time intervals, singular value decomposition, scalar evaluation of processes quality

***Data on authors***

| | | |
|---|---|---|
| ***Andrey S. Pavlov*** | — | Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: a.s.pavlov@email.su |
| ***Anatoly V. Ushakov*** | — | Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Computer Science and Control Systems; E-mail: ushakov-avg@yandex.ru |

**For citation**: *Pavlov A. S., Ushakov A. V.* Analysis of process quality in time-variant discrete multichannel systems // Journal of Instrument Engineering. 2017. Vol. 60, N 4. P. 302—310 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2017-60-4-302-310