

Применение технологии вложения систем для исследования инвариантности выхода сложной электрической системы по переменным состояниям

АЛЛАЕВ К.Р., МИРЗАБАЕВ А.М., МАХМУДОВ Т.Ф., МАХКАМОВ Т.А.

Приведенная методика синтеза регулятора электрической системы, основанная на технологии вложения систем, достаточно проста, так как основана на современной теории матриц, приспособленных для компьютерного применения, и поэтому может быть рекомендована для исследования сложных автоматически регулируемых электроэнергетических систем. На основе метода канонизации матриц, являющегося основой технологии вложения систем, обоснованы условия инвариантности выхода электрической системы к произвольным внешним возмущениям с синтезированным регулятором. Основным отличием применения технологии вложения систем является снижение объема вычислительных затрат, так как данная технология опирается на матричный анализ, для которого разработаны программные комплексы. Кроме того, весьма важным является также аналитическое описание класса регуляторов, обеспечивающих требуемые динамические свойства исследуемых систем, в том числе инвариантность. Полученные результаты показывают высокую эффективность технологии вложения систем, поэтому можно рекомендовать ее применение при диспетчерском управлении сложных электрических систем.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрическая система, технология вложения систем, инвариантность, теория матриц, регулятор

Технология вложения систем — универсальная совокупность методов и приемов решения задач теории систем, основанная, прежде всего, на современных достижениях алгебры и сводящаяся к определению условий, при которых динамические свойства сложно организованной системы можно получить в условиях относительно более простой системы [1].

Технология вложения систем обладает следующими особенностями:

- ориентирована на аналитические исследования и синтез линейных многосвязных систем;

- учитывает широкий спектр структурных свойств (полюсы, все типы нулей, алгебраические особенности) исследуемой или синтезируемой линейной системы;

- предоставляет возможность получения всего множества эквивалентных (неразличимых по постановке задачи) результатов анализа или синтеза линейных стационарных динамических систем, если искомое решение существует и не является единственным.

Далее приводятся результаты применения технологии вложения систем для исследования инвариантности выхода сложных регулируемых ЭСС при малых возмущениях. Это связано с тем, что вход-выходные множества сложных ЭЭС подвержены неоднозначным преобразованиям, связанным с наличием делителей нуля и некоммутатив-

ностью операторов [2], т.е. алгебраическими особенностями исследуемой системы, характерными только для многомерных систем [1].

Инвариантность. Необходимо отметить, что проблема инвариантности достаточно обширна [3, 4–6, 9]. Допустим, что исследуемая система в пространстве состояний представлена уравнениями [7]:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Sw; \quad (1)$$

$$u = -Kx; \quad (2)$$

$$y = Cx, \quad (3)$$

где x , u , y , w — векторы состояния, управления, выхода и возмущения системы соответственно; A , B , C , S — матрицы коэффициентов уравнений (1)–(3) с постоянными числовыми элементами соответствующих размеров; K — матрица с постоянными числовыми элементами, называемая регулятором.

Согласно [7] инвариантность выхода регулируемой исследуемой динамической системы обеспечивается, если передаточная матрица от возмущения $w(p)$ к выходу системы $y(p)$ с моделью в пространстве состояний тождественно равна нулю:

$$F_y^w(p) = C(pI_n - A_y)^{-1}S = 0, \quad (4)$$

где $A_y = A + BK$ — матрица динамики системы с регулятором.

Основная задача — определение регулятора (синтезирование), обеспечивающего выполнение условия (4). Однако, как отмечается в [7], при решении этой задачи возникают определенные трудности, так как в (4) присутствует операция обращения матрицы, причем, как правило, полиномиальной.

Необходимые и достаточные условия, при которых справедливо тождество (4), обеспечиваются в случае выполнения требований теоремы [7], утверждающей, что система (1)–(4) при заданных матрицах A, B, C и S обладает инвариантностью к возмущениям в смысле выполнения тождества (4) тогда и только тогда, когда выполняется условие

$$\overline{\overline{C}^R \pi}^L S = 0, \tag{5}$$

где π — матрица максимального столбцового ранга, соответствующая условию

$$\overline{\overline{C}^R \pi}^L A_y \overline{C}^R \pi = 0, \tag{6}$$

в котором удовлетворяется тождество

$$\overline{\overline{C}^R \pi}^L B \overline{\overline{C}^R \pi}^L A C^R \pi = 0 \tag{7}$$

и система замкнута любым регулятором из множества

$$\{K\}_{\gamma, \chi} = - \left(\overline{\overline{C}^R \pi}^L B \right)^{\%} + \overline{\overline{C}^R \pi}^L A C^R \pi \left(\overline{\overline{C}^R \pi}^L \right)^{\%} + \overline{\overline{C}^R \pi}^L K \overline{\overline{C}^R \pi}^L \chi + \gamma \overline{\overline{C}^R \pi}^L, \tag{8}$$

где χ и γ — матрицы заданных размеров с произвольными числовыми элементами; \overline{C}^R — правый делитель нуля матрицы C ; $\overline{\overline{C}^R \pi}^L$ — левый делитель нуля матрицы $\overline{C}^R \pi$; двойная и тройная черта над матрицами обозначают повторное определение соответствующего делителя нуля максимального ранга от комбинации матриц, стоящих под этой чертой.

Алгоритм, позволяющий сформировать матрицу π максимального ранга, удовлетворяющую условию (6), за конечное число шагов состоит в следующем [7].

1. Проверяется условие

$$\overline{CB}^L \overline{CAC}^R = 0. \tag{9}$$

Если это условие выполняется, то принимается $\pi = \pi_0 = I_{(n - rank C)}$.

2. Если условие (9) не выполняется, то матрица π_1 определяется по формуле

$$\pi_1 = \overline{CB}^L \overline{CAC}^R. \tag{10}$$

Если $\pi_1 = 0$, то система не обладает инвариантностью, алгоритм останавливается. В противном случае проверяется условие (6) при $\pi = \pi_1$.

3. Матрица π_i при $i > 1$ определяется по формуле

$$\pi_i = \overline{\overline{\overline{C}^R \pi_{i-1}}^L}^L B \overline{\overline{C}^R \pi_{i-1}}^L A C^R, \tag{11}$$

и проверяется выполнение условия (7).

4. Алгоритм останавливается на k -м шаге при первом выполнении условия (7). Матрица π максимального ранга имеет значение π_k .

Следовательно, проверка инвариантности уравнений (1)–(4) по выходу сводится к приведенному итерационному процессу определения π , и вычисления передаточной матрицы $F_y^w(p)$ не требуется.

Как указано в [1], для регулируемой динамической системы со статическим регулятором

$$u = -Kx \tag{12}$$

проматрица имеет вид:

$$\Omega(p) = \begin{bmatrix} pI_n - A & -B \\ K & I_s \end{bmatrix}, \tag{13}$$

где A, B, C — заданные числовые матрицы; K — матрица коэффициентов регулятора (n — степень математической модели объекта исследуемой системы; s — количество выходов регулятора).

При заданных A, B, C задача заключается в формировании матрицы K по следующему принципу.

В (13) матрицу коэффициентов регулятора K сложной регулируемой электрической системы можно представить в виде:

$$K = \begin{bmatrix} k_{E_{q1}}^{\Delta\delta_1} \dots k_{E_{q1}}^{\Delta\delta_n} & k_{E_{q1}}^{\Delta s_1} \dots k_{E_{q1}}^{\Delta s_n} \\ k_{E_{q2}}^{\Delta\delta_1} \dots k_{E_{q2}}^{\Delta\delta_n} & k_{E_{q2}}^{\Delta s_1} \dots k_{E_{q2}}^{\Delta s_n} \\ \dots & \dots \\ k_{E_{qn}}^{\Delta\delta_1} \dots k_{E_{qn}}^{\Delta\delta_n} & k_{E_{qn}}^{\Delta s_1} \dots k_{E_{qn}}^{\Delta s_n} \end{bmatrix}, \tag{14}$$

где $k_{E_{qi}}^{\Delta\delta_i}$ — коэффициент усиления по каналу АРВ i -го генератора по отклонению собственного абсолютного угла; $k_{E_{qi}}^{\Delta s_i}$ — коэффициент соответственно по отклонению скольжения данного генератора, причем $i, j = 1 - n$ (размер матрицы (14) равен $n \times 2n$).

При этом АРВ реагирует на отклонение собственного угла i -го генератора $\Delta\delta_i$ и его производной $s_i = \frac{d(\Delta\delta_i)}{dt}$.

Если $i = j$, то учитывается собственное регулирование, если $i \neq j$, то — взаимное регулирование. Как правило, в сложной ЭЭС взаимное регулирование не используется, поэтому $k_{E_{qi}}^{\Delta\delta_i} = 0$, так как $i \neq j$. В связи с этим матрица (14) для трехгенераторной электрической системы принимает вид [8]:

$$K = \begin{bmatrix} k_{E_{q1}}^{\Delta\delta_1} & 0 & 0 & k_{E_{q1}}^{\Delta s_1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{E_{q2}}^{\Delta\delta_2} & 0 & 0 & k_{E_{q2}}^{\Delta s_2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{E_{q3}}^{\Delta\delta_3} & 0 & 0 & k_{E_{q3}}^{\Delta s_3} \end{bmatrix} \quad (15)$$

с коэффициентами по параметрам режима электрической системы.

С учетом отмеченных особенностей формирования модели управления в сложной ЭЭС проматрица регулирования трехгенераторной электрической системы приобретает вид:

$$\Omega = \begin{bmatrix} p & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & p & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & p & 0 & 0 & -1 \\ \omega_{11} & -\omega_{12} & -\omega_{13} & (p+P_{d1}) & 0 & 0 \\ -\omega_{21} & \omega_{22} & -\omega_{23} & 0 & (p+P_{d2}) & 0 \\ -\omega_{31} & -\omega_{32} & \omega_{33} & 0 & 0 & (p+P_{d3}) \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\begin{bmatrix} k_{E_{q1}}^{\Delta\delta_1} & 0 & 0 & k_{E_{q1}}^{\Delta s_1} & 0 & 0 \\ 0 & k_{E_{q2}}^{\Delta\delta_2} & 0 & 0 & k_{E_{q2}}^{\Delta s_2} & 0 \\ 0 & 0 & k_{E_{q3}}^{\Delta\delta_3} & 0 & 0 & k_{E_{q3}}^{\Delta s_3} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{dP_1}{dF_{q1}} \frac{\omega_0}{T_{J1}} & 0 & 0 & 0 \\ \rightarrow 0 & \frac{dP_2}{dF_{q2}} \frac{\omega_0}{T_{J2}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dP_3}{dF_{q3}} \frac{\omega_0}{T_{J3}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Детерминант (16) определяет характеристический полином регулируемой электрической системы.

Пример. Используем приведенный метод определения инвариантности динамической системы по выходу на примере регулируемой трехгенераторной

электрической системы, без учета демпферных коэффициентов генераторов (рис. 1). Параметры исходного режима и системы генераторов: $P_{Г1}=P_{Г2}=P_{Г3}=750$ МВт; $\cos\varphi_{Г1}=0,85$; $\cos\varphi_{Г2}=0,8$; $\cos\varphi_{Г3}=0,82$; $\delta_{10}=75^\circ$; $\delta_{20}=72^\circ$; $\delta_{30}=70^\circ$; $E_{q1}=2,29$; $E_{q2}=2,5$; $E_{q3}=3,5$; $X_{12}=6,43$; $X_{23}=6,16$; $X_{13}=7,24$; $T_{J1}=10$ с; $T_{J2}=10$ с; $T_{J3}=10$ с; $P_{1Н}=1550$ МВт; $\cos\varphi_1=0,9$; $P_{2Н}=150$ МВт; $\cos\varphi_2=0,95$; $P_{3Н}=100$ МВт; $\cos\varphi_3=0,92$.

Матрицы собственной динамики модели исследуемой ЭЭС:

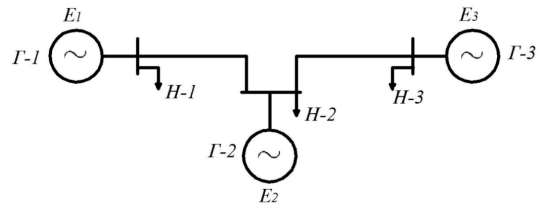


Рис. 1. Схема трехгенераторной электрической системы [8]

дуюмой ЭЭС:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\omega_{11} & \omega_{12} & \omega_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{21} & -\omega_{22} & \omega_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \omega_{31} & \omega_{32} & -\omega_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -57,2 & 27,53 & 33,42 & 0 & 0 & 0 \\ 39,33 & -92,08 & 50,53 & 0 & 0 & 0 \\ 23,61 & 50,53 & -95,15 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (17)$$

$$C = [\Delta\delta_1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (18)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{dP_1}{dF_{q1}} \frac{\omega_0}{T_{J1}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{dP_1}{dF_{q1}} \frac{\omega_0}{T_{J1}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{dP_1}{dF_{q1}} \frac{\omega_0}{T_{J1}} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -2,0837 & 0 & 0 \\ 0 & -2,0678 & 0 \\ 0 & 0 & 0,9706 \end{bmatrix}, \quad (19)$$

Расчет показывает, что при заданных исходных параметрах режима система неустойчива, что видно из спектра матрицы собственной динамики (17) исследуемой ЭЭС: $0,0000 \pm 11,9757i$; $-0,0000 \pm 9,7538i$; $0,0000 \pm 2,4239i$.

Для проверки требуемых условий инвариантности выхода ЭЭС и в конечном результате определения параметров регулятора (4,186) найдем последовательно соответствующие матрицы.

Условие (9) требует определения правого делителя матрицы C и левого делителя матрицы CB , которые получим в результате канонизации этих матриц:

$$\bar{C}^R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad CB = [000]; \quad \bar{C}B^L = [000]^L = 1;$$

$$CAC^R = [00100]; \quad \bar{C}B^L CAC^R = [00100] \neq 0.$$

Условие (9) не выполняется, поэтому по формуле (10) определяем матрицу π_1 :

$$\pi_1 = \frac{\bar{C}B^L CAC^R}{\bar{C}B^L CAC^R} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Проверяем условие выполнения (7) при $\pi = \pi_1$:

$$\bar{C}^R \pi_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \bar{C}^R \pi_1^L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\bar{C}^R \pi_1^L B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 2,0837 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \bar{C}^R \pi_1^L B = [1 \ 0];$$

$$\bar{C}^R \pi_1^L AC^R \pi_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 33,42 & 27,53 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} B \frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} AC^R \pi_1 = [0000].$$

Таким образом, условие (7) выполняется. Далее проверим выполнение условия (5):

$$\bar{C}^R \pi_1^L S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, можно формировать матрицу коэффициентов регулятора (6), так как выполняется условие (5), для чего необходимо определить матрицы, входящие в эту формулу:

$$\left(\frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} B \right)^{\%} = \begin{bmatrix} 0 & 0,4799 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\left(\frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} \right)^{\%} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Подставляя в (6) полученные числовые значения матриц, получим:

$$\{K\}_{\gamma, \chi} = - \left(\frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} B \right)^{\%} \frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} AC^R \pi_1 \left(\frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} \right)^{\%} \times \frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} B \chi + \gamma \frac{\bar{C}^R \pi_1^L}{\bar{C}^R \pi_1} =$$

$$= \begin{bmatrix} \gamma_{11} & -13,2116 & -16,0383 & \gamma_{12} & 0 & 0 \\ (\gamma_{31} + \chi_1) & \chi_2 & \chi_3 & (\gamma_{22} + \chi_4) & \chi_5 & \chi_6 \\ \gamma_{31} & 0 & 0 & \gamma_{32} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

где формирующие матрицы χ и γ с произвольными числовыми значениями приняты в виде:

$$\chi = [\chi_1 \ \chi_2 \ \chi_3 \ \chi_4 \ \chi_5 \ \chi_6] \text{ и } \gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \\ \gamma_{31} & \gamma_{32} \end{bmatrix}.$$

Синтезированный регулятор (15) с матрицами χ и γ с произвольными числовыми значениями элементов должен быть сконструирован таким образом, чтобы в динамической системе были обеспечены необходимые технические требования: устойчивость, демпфирование низкочастотных колебаний и др.

Необходимо (20) согласовать с (15), а именно, можно считать $k_{E_{q1}}^{\Delta\delta_1} = \gamma_{11}$, $k_{E_{q1}}^{\Delta s_1} = \gamma_{12}$, $k_{E_{q2}}^{\Delta\delta_2} = \chi_2$, $k_{E_{q2}}^{\Delta s_2} = \chi_5$, а остальные элементы равны нулю, и окончательно матрица коэффициентов регулятора (20) будет иметь вид:

$$\{K\}_{\gamma, \chi} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & 0 & 0 & \gamma_{12} & 0 & 0 \\ 0 & \chi_2 & 0 & 0 & \chi_5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (21)$$

Характерно, что при выбранной матрице выхода исследуемой системы S и матрице возмущений S третий регулятор не участвует в регулировании режима сложной электрической системы.

Далее проверяется влияние регулятора (21) на спектр собственной динамики регулируемой электрической системы, имеющей матрицу

$$A_y = A + BK. \quad (22)$$

Выберем коэффициенты: $k_{E_{q1}}^{\Delta\delta_1} = \gamma_{11} = -10$; $k_{E_{q1}}^{\Delta s_1} = \gamma_{12} = -2$; $k_{E_{q2}}^{\Delta\delta_2} = \chi_2 = 8$; $k_{E_{q2}}^{\Delta s_2} = \chi_5 = 1$, при которых матрица (22) равна

$$A_y = A + BK = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -78,037 & 27,53 & 33,42 & -4,1674 & 0 & 0 \\ 39,33 & -108,6224 & 50,53 & 0 & -2,0678 & 0 \\ 23,61 & 50,53 & -95,15 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

со спектром: $-1,0790 \pm 4,2951i$; $-0,6007 \pm 12,2361i$; $-1,4379 \pm 10,3156i$. С выбранными параметрами регулятора (21) электрическая система стала устойчивой с одной электромеханической частотой 0,6839 Гц и двумя электромагнитными частотами, соответственно 1,6426 и 1,9484 Гц (рис. 2).

Очевидно, что на основе матрицы (22) можно комплексно исследовать динамические свойства трехгенераторной регулируемой электрической системы, варьируя параметры регулятора (21) и, в том числе, определить условия инвариантности выхода исследуемой системы к возмущениям, возникающим в исследуемой системе.

На рис. 3 приведены характеристики изменения отклонения угла первого генератора $\Delta\delta_1 = f(t)$ в устойчивой, регулируемой (22) электрической системе (рис. 3,а) при синтезированных параметрах регулятора (21) и неустойчивой, нерегулируемой

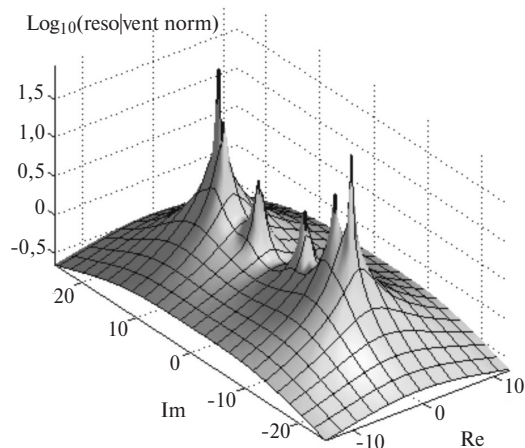


Рис. 2. 3D-визуализация корней управляемой трехгенераторной электрической системы со спектром: $-1,0790 \pm 4,2951i$; $-0,6007 \pm 12,2361i$; $-1,4379 \pm 10,3156i$

ЭЭС (17), (рис. 3,б). Процесс затухает достаточно быстро и имеет почти аperiодический характер.

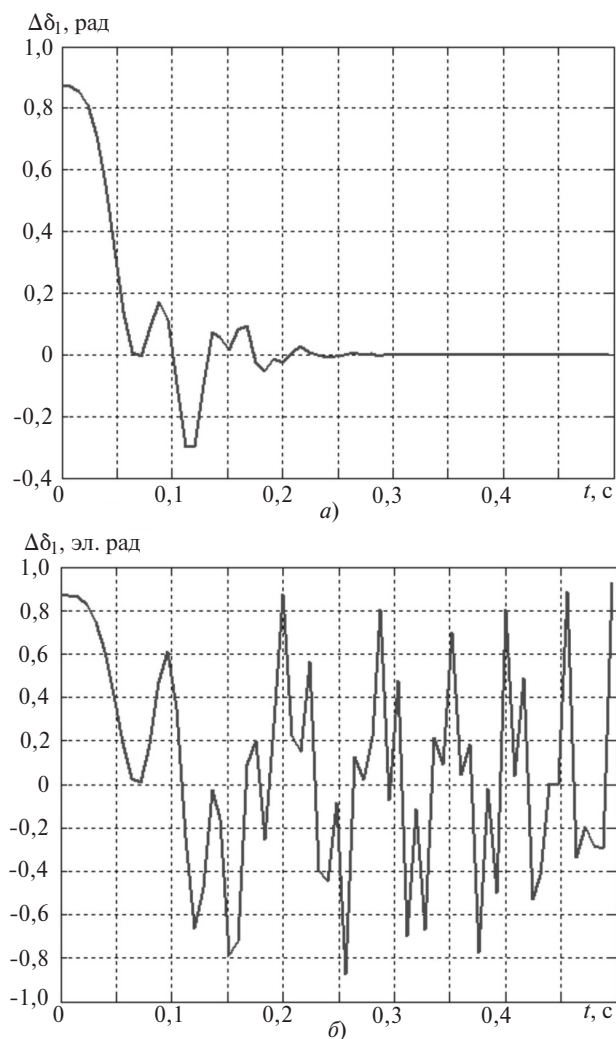


Рис. 3. Характеристики изменения угла первого генератора $\Delta\delta_1 = f(t)$ трехгенераторной электрической системы: а — при $k_{E_{q1}}^{\Delta\delta_1} = \gamma_{11} = -10$; $k_{E_{q1}}^{\Delta s_1} = \gamma_{12} = -2$; $k_{E_{q2}}^{\Delta\delta_2} = \chi_2 = 8$; $k_{E_{q2}}^{\Delta s_2} = \chi_5 = 1$; б — $-k_{E_{q1}}^{\Delta\delta_1} = k_{E_{q2}}^{\Delta\delta_2} = k_{E_{q2}}^{\Delta s_2} = k_{E_{q1}}^{\Delta s_1} = 0$ и $P_{d1} = P_{d2} = P_{d3} = 0$

Заключение. Приведенная методика синтеза регулятора электрической системы, основанная на технологии вложения систем, достаточно проста, так как основана на современной теории матриц, приспособленных для компьютерного применения, и поэтому вычислительно эффективна и может быть рекомендована для исследования сложных автоматически регулируемых ЭЭС.

Можно отметить, что на основе метода канонизации матриц, являющегося основой технологии вложения систем, обоснованы условия инвариантности выхода электрической системы к произвольным внешним возмущениям с синтезированным регулятором.

Основным отличием применения технологии вложения систем является снижение объема вычислительных затрат, так как данная технология опирается на матричный анализ, для которого разработаны богатые программные комплексы. Кроме этого, весьма важным является также аналитическое описание класса регуляторов, обеспечивающих требуемые динамические свойства исследуемых систем, в том числе инвариантность.

Полученные результаты показывают высокую эффективность технологии вложения систем, и поэтому можно рекомендовать ее применение при диспетчерском управлении сложных электрических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. — Калуга: Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2006, 720 с.

2. Мисриханов М.Ш. Классические и новые методы анализа многомерных динамических систем. — М.: Энергоатомиздат, 2004, 438 с.

3. Шипанов Г.В. Теория и методы проектирования автоматических регуляторов. — Автоматика и телемеханика, 1939, № 1, с. 49—66.

4. Буков В.Н., Горюнов С.В., Рябченко В.Н. Анализ и синтез матричных линейных систем. Сравнение подходов. — Автоматика и телемеханика, 2000, № 11, с. 3—43.

5. Петров Б.Н. О реализуемости условий инвариантности. — Труды конф. «Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах». Киев, 1958, с. 21—29.

6. Алиев Р.А. Принцип инвариантности и его применение. М.: Энергоатомиздат, 1985, 128 с.

7. Буков В.Н., Бронников А.М. Условия инвариантности выхода линейных систем. М.: Автоматика и телемеханика, 2005, № 2, с. 23—35.

[17.10.2018]

А в т о р ы: Аллаев Кахраман Рахимович окончил Московский энергетический институт в 1965 г. В 1991 г. защитил докторскую диссертацию. Профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы», Ташкентский государственный технический университет (ТГТУ).

Мирзабаев Акрам Махкамович окончил Ташкентский политехнический институт в 1984 г. Докторскую диссертацию защитил в 2016 г. Ведущий научный сотрудник, Международный институт солнечной энергии.

Махмудов Тахир Фирхадович — Аспирант ТГТУ.

Махкамов Темура Акромович окончил Московский энергетический институт в 2014 г. Руководитель отдела АСУ ТП, ООО «ОЛАЙСИС».

Elektrichestvo, 2019, No. 2, pp. 26–32

DOI:10.24160/0013-5380-2019-2-26-32

Application of the System Nesting Technology for Studying the Invariance of a Complex Electric System Output in Terms of State Variables

ALLAYEV Kakhraman R. (*Tashkent State Technical University (TSTU), Tashkent, Uzbekistan*) — Professor, Dr. Sci. (Eng.)

MIRZABAYEV Akram M. (*International Institute of Sunny Energy, Tashkent, Uzbekistan*) — Leading Researcher, Dr. Sci. (Eng.)

MAKHMUDOV Takhir F. (*TSTU, Tashkent, Uzbekistan*) — Graduate Student

MAKHKAMOV Temur A. (*LLC «OLAISIS», Moscow, Russia*) — Leader of Department

The presented technique for synthesizing the electric system controller based on the system nesting technology is sufficiently simple because it is based on the modern theory of matrices suited for computer applications and therefore can be recommended for investigating complex automatically controlled electric power systems. The conditions for invariance of the electric system output with a synthesized controller to arbitrary external disturbances are substantiated using the matrix canonization method, which serves as a basis of the system nesting technology. The main distinctive feature of using the system nesting technology consists in a reduced amount of computation efforts because this technology rests on matrix analysis

techniques, for which software packages have been developed. Another important aspect is that the class of controllers imparting the required dynamic properties to the studied systems, including invariance, is described analytically. The obtained results demonstrate high efficiency of the system nesting technology, due to which it can be recommended for being used in performing dispatch control of complex electrical systems.

Key words: electrical system, system nesting technology, invariance, theory matrices, controller

REFERENCES

1. **Bukov V.N.** *Vlozheniye sistem. Analiticheskii podkhod k analizu i sintezu matrichnykh sistem* (An analytical approach to analysis and synthesis of matrix systems). Kaluga, Publ. of N.F. Bochkarevoi, 2006, 720 p.
2. **Misrikhanov M.Sh.** *Klassicheskiye i novye metody analiza mnogomernykh dinamicheskikh sistem* (Classic and new methods for analyzing multidimensional dynamic systems). Moscow, Energoatomizdat, 2004, 438 p.
3. **Shchipanov G.V.** *Avtomatika i telemekhanika – in Russ. (Automation and telemechanics)*, 1939, No. 1, pp. 49–66.
4. **Bukov V.N., Goryunov S.V., Ryabchenko V.N.** *Avtomatika i telemekhanika – in Russ. (Automation and telemechanics)*, 2000, No. 11, pp. 3–43.
5. **Petrov B.N.** *O realizuemosti uslovii invariantnosti. – Trudy konf. «Teoriya invariantnosti i ego primeneniye v avtomaticheskikh ustroystvakh»* (On the Realizability of Invariance Conditions. Proceedings of conf. «The theory of invariance and its application in automatic devices»). Kiyev, 1958, pp. 21–29.
6. **Aliyev R.A.** *Printsip invariantnosti i ego primeneniye* (The invariance principle and its application). Moscow, Energoatomizdat, 1985, 128 p.
7. **Bukov V.N., Bronnikov A.M.** *Avtomatika i telemekhanika – in Russ. (Automation and telemechanics)*, 2005, No. 2, pp. 23–35.

[17.10.2018]