

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 519.7

Ю. С. КАБАЛЬНОВ, А. В. МАРГАМОВ, Е. А. СМИРНОВА

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ  
СИСТЕМ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Предложены векторно-матричная модель линейных систем координированного управления, алгебраический и частотный методы исследования устойчивости линейных однотипных систем координированного управления. Методы базируются на алгебраическом и частотном методах исследования устойчивости однотипных многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами. *Координация ; управление сложными объектами ; устойчивость*

## ВВЕДЕНИЕ

Класс однотипных систем координированного управления (СКУ) представляет интерес как с практической, так и с теоретической точек зрения. Системы данного класса позволяют обеспечивать заданные функциональные соотношения между выходными координатами локальных подсистем. Это позволяет поддерживать данные соотношения на динамических режимах работы, вызванных действием достаточно больших по величине неконтролируемых возмущений, когда возможность их компенсации методами теории инвариантности оказывается исчерпанными; при имеющихся ограничениях на ресурсы управления (ограниченное быстроедействие и мощность исполнительных механизмов, наличие ограничений типа «физических упоров»), на изменение их выходных переменных и т. д. В этом случае приходится прибегать к обеспечению данных условий на уровне системы в целом посредством введения координирующих обратных связей между локальными подсистемами с помощью координированного управления. Например, в нефтеперерабатывающей промышленности, используя методы координированного управления, можно обеспечить заданные качества получаемых нефтепродуктов в условиях параметрических и сигнальных возмущений (нестабильность характеристик сырья, изменение параметров энергоносителей, износ оборудования или выхода из строя отдельных его элементов, изменение условий внешней среды: температуры, влажности и т. д.). Примерами координированного управления также могут служить системы управления

многодвигательными установками летательных аппаратов, обеспечение заданных пропорций реагентов в химическом производстве. Теоретический интерес к однотипным СКУ вызван возможностью разработки новых методов исследования, которые будут более простыми и эффективными по сравнению с методами исследования, рассчитанными на многосвязные системы общего вида.

1. ВЕКТОРНО-МАТРИЧНАЯ МОДЕЛЬ  
ЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ  
КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Пусть имеются  $n$  устойчивых однотипных локальных систем, каждая из которых представляет последовательное соединение регулятора, объекта управления при действии возмущающего воздействия, которые охвачены отрицательной обратной связью. Локальные системы образуют некоторую технологическую систему, которая поддерживает следующие линейные зависимости между выходными координатами:

$$\begin{cases} y_1 = b_{12}y_2 + b_{13}y_3 + \dots + b_{1,n-1}y_{n-1} + b_{1n}y_n, \\ y_2 = b_{21}y_1 + b_{23}y_3 + \dots + b_{2,n-1}y_{n-1} + b_{2n}y_n, \\ \dots \\ y_n = b_{n1}y_1 + b_{n2}y_2 + b_{n3}y_3 + \dots + b_{n,n-1}y_{n-1}; \end{cases} \quad (1)$$

Рассмотрим наиболее простой случай координации двух устойчивых однотипных подсистем, которая поддерживает следующие линейные зависимости между выходными координатами:

$$\begin{cases} y_1(t) = b_1 y_2(t), \\ y_2(t) = 1/b_1 y_1(t). \end{cases} \quad (2)$$

Структурная схема системы координации (2) представлена на рис. 1.

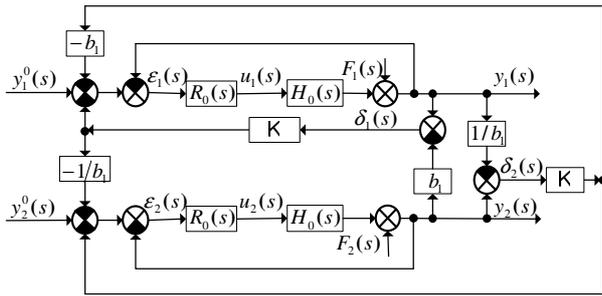


Рис. 1. Структурная схема рассматриваемой 2-канальной СКУ

Здесь  $y_1^0(s)$ ,  $y_2^0(s)$ ,  $y_1(s)$ ,  $y_2(s)$ ,  $\delta_1(s)$ ,  $\delta_2(s)$ ,  $F_1(s)$ ,  $F_2(s)$ ,  $\epsilon_1(s)$ ,  $\epsilon_2(s)$ ,  $u_1(s)$ ,  $u_2(s)$  – изображения по Лапласу соответственно задающих воздействий, выходных координат, ошибки координации, возмущающих воздействий, обобщенных ошибок, управляющих воздействий.  $R_0(s)$  – передаточная функция регулятора,  $H_0(s)$  – передаточная функция, описывающая объект управления ( $H_0(s)$ , полагается устойчивой и минимально-фазовой),  $K$  – коэффициент усиления контура координации. При введении контура координирующего управления в обратной связи введены коэффициенты  $-b_1$  и  $-1/b_1$  соответственно при  $K\delta_2(s)$ , входящей в первую подсистему, и при  $K\delta_1(s)$ , входящей во вторую подсистему. Это обусловлено необходимостью сохранения однотипности сепаратных каналов. Эти коэффициенты определяются как единица разделенная на коэффициент при выходной координате соответствующего канала в записи ошибки координации  $\delta_i(s)$ .

В матричном виде структурная схема СКУ (рис. 1) представлена на рис. 2.

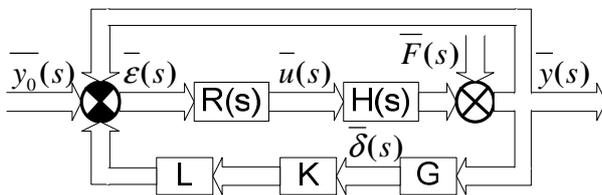


Рис. 2. Векторно-матричная структурная схема рассматриваемой СКУ

Здесь

$$R(s) = \begin{bmatrix} R_0(s) & 0 \\ 0 & R_0(s) \end{bmatrix}, \quad H(s) = \begin{bmatrix} H_0(s) & 0 \\ 0 & H_0(s) \end{bmatrix} -$$

передаточные матричные функции соответственно регулятора и объекта управления, вектор ошибок координации:

$$\bar{\delta}(s) = \begin{bmatrix} y_1(s) - b_1 y_2(s) \\ y_2(s) - 1/b_1 y_1(s) \end{bmatrix},$$

преобразующие матрицы:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & -b_1 \\ -1/b_1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$L = \begin{bmatrix} 1 & -b_1 \\ -1/b_1 & 1 \end{bmatrix}.$$

В случае координации  $n$  устойчивых подсистем, которая обеспечивает поддержание зависимостей между выходными координатами вида (1), структурную схему также можно представить в виде матричной структурной схемы, изображенной на рис. 2, где

$$\bar{\delta}(s) = \begin{cases} y_1 - b_{12}y_2 - b_{13}y_3 - \dots - b_{1,n-1}y_{n-1} - b_{1n}y_n, \\ y_2 - b_{21}y_1 - b_{23}y_3 - \dots - b_{2,n-1}y_{n-1} - b_{2n}y_n, \\ \dots \\ y_n - b_{n1}y_1 - b_{n2}y_2 - b_{n3}y_3 - \dots - b_{n,n-1}y_{n-1}; \end{cases}$$

$L$  и  $G$  – преобразующие матрицы размерности  $n \times n$ ;  $G$  составляется по правилу:  $g_{ij}$  – коэффициент перед  $y_i(s)$  соответствующего значения ошибки координации  $\delta_i(s)$ :

$$G = \begin{bmatrix} 1 & -b_{12} & -b_{13} & \dots & -b_{1,n-1} & -b_{1n} \\ -b_{21} & 1 & -b_{23} & \dots & -b_{2,n-1} & -b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -b_{n1} & -b_{n2} & -b_{n3} & \dots & -b_{n,n-1} & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$L$  составляется по правилу:

$$l_{ij} = \begin{cases} 1/g_{ji}, & \text{если } g_{ji} \neq 0, \\ 0, & \text{если } g_{ji} = 0; \end{cases}$$

т. е.:

$$L = \begin{bmatrix} 1 & -1/b_{21} & \dots & -1/b_{n1} \\ -1/b_{12} & 1 & \dots & -1/b_{n2} \\ -1/b_{13} & -1/b_{23} & \dots & -1/b_{n3} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -1/b_{1,n-1} & -1/b_{2,n-1} & \dots & -1/b_{n,n-1} \\ -1/b_{1n} & -1/b_{2n} & \dots & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$R(s) = \text{diag}\{R_0(s)\}_{n \times n}$ ,  $H(s) = \text{diag}\{H_0(s)\}_{n \times n}$  – передаточные матричные функции соответственно регулятора и объекта управления.

Введем в рассмотрение матрицу  $\theta$ , определяемую формулой:

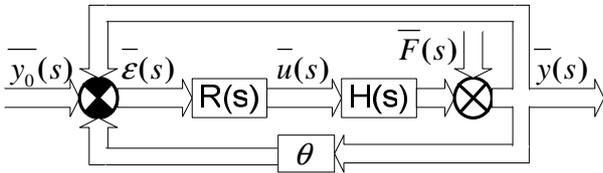
$$\theta = LKG. \quad (4)$$

Поскольку необходимо сохранить однотипность сепаратных каналов, то, с учетом (3) и (4), диа-

гональные элементы матрицы  $\theta$  будут одинаковы, т. е. :

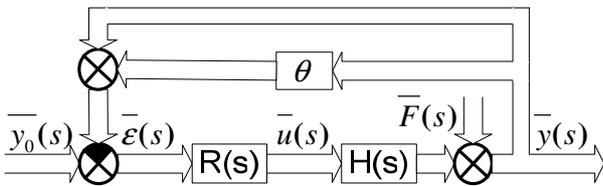
$$\theta_{11} = \theta_{22} = \dots = \theta_{nn}$$

Таким образом, структурная схема СКУ (рис. 2) примет вид (рис. 3).

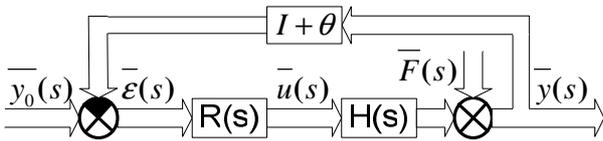


**Рис. 3.** Векторно-матричная структурная схема рассматриваемой  $n$ -канальной СКУ, после введенного обозначения  $\theta$

В структурной схеме, представленной на рис. 3, объединим две обратные связи в одну (рис. 4, 5).



**Рис. 4.** Векторно-матричная схема рассматриваемой  $n$ -канальной СКУ



**Рис. 5** Векторно-матричная схема рассматриваемой  $n$ -канальной СКУ

После проведенных тождественных преобразований структурная схема рассматриваемой СКУ представлена на рис. 5.

Требуется исследовать устойчивость данного класса СКУ.

Структурная схема рассматриваемой системы координации (рис. 5) подобна структурной схеме однотипной многосвязной системы автоматического управления (МСАУ) с голономными связями между подсистемами, рассмотренной в [3]. Для исследования устойчивости данной МСАУ в той же работе предложены алгебраический и частотный методы, позволяющие достаточно просто оценивать влияние динамических свойств отдельных подсистем и коэффициентов связей на устойчивость однотипной МСАУ.

В силу однотипности, передаточные функции отдельных подсистем рассматриваемой системы будут одинаковыми и равны:

$$\Phi(s) = \Phi_{ii}(s) = \frac{R_0(s)H_0(s)}{1 + (1 + \theta_{ii})R_0(s)H_0(s)}, \quad (5)$$

$\Phi(s)$  полагается устойчивой и физически реализуемой.

## 2. СИСТЕМНАЯ ФОРМА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОГО УРАВНЕНИЯ ОДНОТИПНОЙ СИСТЕМЫ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Согласно [2] характеристическое уравнение однотипных многомерных систем автоматического управления можно представить в системной форме:

$$1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) + \dots + h_n\Phi^n(s) = 0, \quad (6)$$

где  $h_2, \dots, h_n$  – постоянные величины, вычисляемые по соответствующим формулам.

Характеристическое уравнение однотипных СКУ также можно представить в системной форме (7), но  $h_2, \dots, h_n$  будут вычисляться по иным формулам. Для выведения этих формул используем метод нахождения коэффициентов уравнения (7), рассмотренный в [2].

Так, уравнение (7) для двумерной ( $n = 2$ ) линейной однотипной СКУ примет вид:

$$1 + h_2\Phi^2(s) = 0,$$

где  $h_2 = -\det\|\theta_{ij}\gamma_{ij}\|$ ;

для трехмерной ( $n = 3$ ):

$$1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) = 0,$$

где  $h_2 = \det\|\theta_{ij}\psi_{ij}\| - \det\|\theta_{ij}\gamma_{ij}\| - 1$ ,  $h_3 = \det\|\theta_{ij}\gamma_{ij}\|$ ;

для четырехмерной ( $n = 4$ ):

$$1 + h_2\Phi^2(s) + h_3\Phi^3(s) + h_4\Phi^4(s) = 0,$$

где

$$h_2 = -\frac{1}{2} \sum_{i \neq j=1}^4 \theta_{ij}\theta_{ji},$$

$$h_3 = \det\|\theta_{ij}\psi_{ij}\| - 1 - h_2 - \det\|\theta_{ij}\gamma_{ij}\|,$$

$$h_4 = \det\|\theta_{ij}\gamma_{ij}\|$$

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ 1, & i \neq j; \end{cases} \quad \psi_{ij} = \begin{cases} 1/\theta_{ii}, & i = j, \\ 1, & i \neq j. \end{cases}$$

Аналогичным способом можно вывести формулы для нахождения коэффициентов СКУ более высокой размерности.

### 3. ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ОДНОТИПНЫХ СИСТЕМ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Составляем уравнение относительно комплексной переменной  $\eta$  (подставляем в (7)  $\Phi(s) = \eta$ ):

$$1 + h_2\eta^2 + h_3\eta^3 + \dots + h_n\eta^n = 0. \quad (8)$$

Пусть  $\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_n$  – корни уравнения (8). Тогда по доказанному в [3] критерию устойчивости, для устойчивости рассматриваемой СКУ необходимо и достаточно, чтобы годограф амплитудно-фазовой характеристики  $\Phi(j\omega)$ ,  $\omega \in (-\infty; +\infty)$ , не охватывал не один из корней уравнения (8).

### 4. АЛГЕБРАИЧЕСКИЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ОДНОТИПНЫХ СИСТЕМ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ

По доказанному в [3] достаточному критерию устойчивости, для определения устойчивости рассматриваемой СКУ необходимо определить параметры  $R$  и  $d$  – соответственно радиуса и центра (в точке  $(d, j0)$ ) окружности, полностью заключающий в себе годограф  $\Phi(j\omega)$ ,  $\omega \in (-\infty; +\infty)$  передаточной функции  $\Phi(s)$ .

$$\eta = R \frac{1-\lambda}{1+\lambda} + d. \quad (9)$$

Выполнив подстановку (9) в (8), получаем уравнение:

$$g_0\lambda^n + g_1\lambda^{n-1} + \dots + g_{n-1}\lambda + g_n = 0, \quad (10)$$

Применим к нему известные алгебраические критерии устойчивости, например критерия Гурвица [1]. Эффективность данного алгебраического метода зависит от максимальной близости внутренних областей окружности и годографа  $\Phi(j\omega)$ ,  $\omega \in (-\infty; +\infty)$ .

### 5. ПРИМЕР

Пусть дана трехмерная ( $n = 3$ ) линейная однотипная СКУ, которая поддерживает следующие зависимости между выходными координатами:

$$\begin{cases} y_1 = y_2 + y_3, \\ y_2 = -y_1 + 2y_3, \\ y_3 = 2y_1 - 4y_2. \end{cases}$$

Рассмотрим два случая.

В первом передаточная функция регулятора  $R_0(s) = \frac{1}{s}$ , передаточная функция объекта

управления  $H_0(s) = \frac{3}{s^2 + 10s + 31}$ ; во втором:

$$R_0(s) = \frac{1}{s}, H_0(s) = \frac{30,5}{s^2 + 10s + 31}.$$

В обоих случаях коэффициент усиления контура координации примем равным  $K = 3$ .

Требуется исследовать устойчивость заданных систем координации.

Для вычисления (перемножения матриц, нахождения корней уравнений, упрощения выражений, вычисления определителей), построения годографа удобно использовать математические пакеты. В работе для вычислений использовался MathCad, графики строились в Maxima.

Вектор ошибок координации:

$$\bar{\delta}(s) = \begin{bmatrix} y_1(s) - y_2(s) - y_3(s) \\ y_1(s) + y_2(s) - 2y_3(s) \\ -2y_1(s) + 4y_2(s) + y_3(s) \end{bmatrix},$$

по (3) и (4) преобразующие матрицы равны:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ -2 & 4 & 1 \end{bmatrix}, L = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1/2 \\ -1 & 1 & 1/4 \\ -1 & -1/2 & 1 \end{bmatrix},$$

по (5):

$$\theta = \begin{bmatrix} 9 & -6 & -10,5 \\ -1,5 & 9 & -2,25 \\ -10,5 & 13,5 & 9 \end{bmatrix}.$$

По (6) найдем передаточные функции отдельных подсистем.

В первом случае

$$\Phi(s) = \frac{3}{s^3 + 10s^2 + 31s + 30},$$

во втором:

$$\Phi(s) = \frac{30,5}{s^3 + 10s^2 + 31s + 305}.$$

Сепаратные каналы в обоих рассматриваемых случаях устойчивы.

Коэффициенты уравнения (7) (характеристики связей) равны:  $h_2 = -88,875$ ,  $h_3 = 70,875$ , т.е. уравнение (7) имеет вид:

$$1 - 88,875\Phi^2(s) + 70,875\Phi^3(s) = 0,$$

уравнение (8):

$$1 - 88,875\eta^2 + 70,875\eta^3 = 0,$$

его корни:  $\eta_1 = 0,11$ ,  $\eta_2 = -0,1$ ,  $\eta_3 = 1,24$ .

Построим годограф и отметим корни уравнения (8).

В первом случае (рис. 6) годограф

$$\Phi(j\omega) = \frac{3}{(j\omega)^3 + 10(j\omega)^2 + 31(j\omega) + 30}, \quad (11)$$

$$\omega \in (-\infty; +\infty)$$

не охватывает ни одного из корней уравнения (8), т. е. по рассмотренному выше частотному методу рассматриваемая СКУ устойчива.

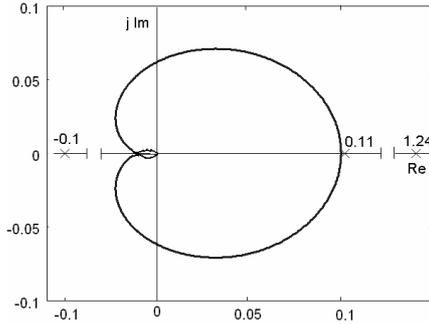


Рис. 6. Годограф (11)

и корни характеристического уравнения СКУ

Во втором случае (рис. 7) годограф

$$\Phi(j\omega) = \frac{30,5}{(j\omega)^3 + 10(j\omega)^2 + 31(j\omega) + 305}, \quad (12)$$

$$\omega \in (-\infty; +\infty)$$

охватывает два корня, т. е. по вышеизложенному частотному методу система неустойчива.

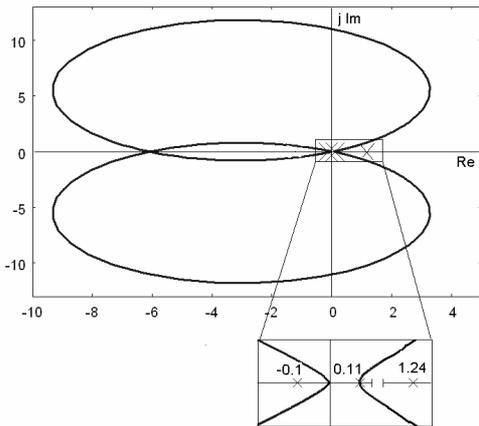


Рис. 7. Годограф (12)

и корни характеристического уравнения СКУ

Проанализируем теперь устойчивость СКУ вышеизложенным алгебраическим методом. Определим параметры радиуса и центра окружности, которая полностью заключает в себе годограф.

Для первого случая определим параметры окружности как  $R = 0,071, d = 0,031$  (рис. 8).

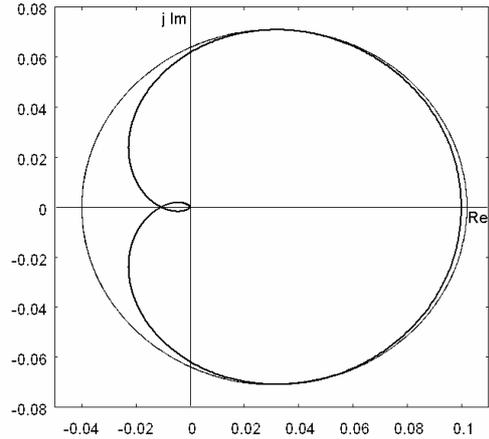


Рис. 8. Окружность с параметрами  $R = 0,071, d = 0,031$  (радиус и центр), заключающая в себе годограф (11)

Подстановка (9) примет вид:

$$\eta = 0,071 \frac{1-\lambda}{1+\lambda} + 0,031,$$

а коэффициенты уравнения (10) будут равны  $g_0 = 0,853, g_1 = 3,618, g_2 = 2,712, g_3 = 0,151$ , т. е. уравнение (10) примет вид:

$$0,853\lambda^3 + 3,618\lambda^2 + 2,712\lambda + 0,151 = 0$$

Все определители Гурвица для уравнения (10) положительны, т.е. система устойчива.

Для второго случая определим параметры окружности как  $R = 11,85, d = -3,1$  (рис. 9).

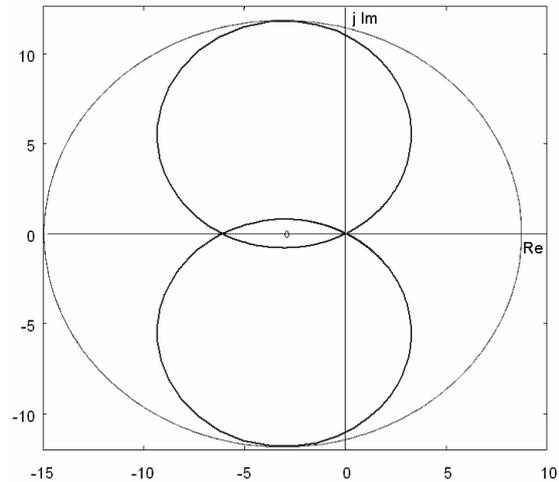


Рис. 9. Окружность с параметрами  $R = 11,85, d = -3,1$  (радиус и центр), заключающая в себе годограф (12)

Подстановка (9) примет вид:  $\eta = 11,85 \frac{1-\lambda}{1+\lambda} - 3,1,$

а коэффициенты уравнения (10) будут равны  $g_0 = -2,567 \times 10^5, g_1 = 4,192 \times 10^5, g_2 =$

$= -2,269 \times 10^5$ ,  $g_3 = 4,068 \times 10^4$ , т. е. уравнение (10) примет вид:

$$-(2,567 \times 10^5) \lambda^3 + (4,192 \times 10^5) \lambda^2 - (2,269 \times 10^5) \lambda + 4,068 \times 10^4 = 0$$

Среди определителей Гурвица для уравнения (10) есть отрицательные, т. е. в силу достаточности условия устойчивости, система может быть как устойчивой, так и не устойчивой.

В подтверждении полученных выше результатов, во-первых, рассмотрим графики переходных процессов моделей систем, во-вторых, определим корни характеристического уравнения (7) систем рассмотренных в обоих случаях, для чего подставим выражение (11) соответственно в первом случае и (12) во втором случае в (7) и решим полученное уравнение относительно переменной  $s$ .

Системы моделировались в среде MatLab. При моделировании единичные ступенчатые возмущения прикладывались к первой системе в момент времени  $t = 1$  с, ко второй –  $t = 5$  с, к третьей –  $t = 8$  с.

Из графиков переходного процесса первой системы (рис. 10) видно, что система устойчива. Вывод об устойчивости системы также подтверждает вид корней ( $\text{Re}(s_i) < 0$ ) характеристического полинома (7) для этой системы:

$$\begin{aligned} s_1 &= -4,95 - 2,35j, & s_2 &= -4,95 + 2,35j, \\ s_3 &= -1,65 - 2,48j, & s_4 &= -1,65 + 2,48j, \\ s_5 &= -4,24 - 0,33j, & s_6 &= -4,24 + 0,33j, \\ s_7 &= -0,099, & s_8 &= -6,69, & s_9 &= -1,53. \end{aligned}$$

Наличие комплексных сопряженных корней говорит о колебательном виде переходной функции.

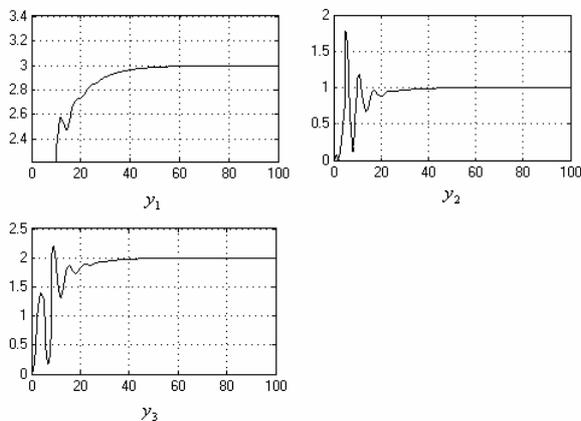


Рис. 10. Переходной процесс для первой системы

Из графика переходного процесса второй системы (рис. 11) видно, что система неустойчива. Неустойчивость системы также подтвер-

ждает и вид корней ( $\text{Re}(s_8) < 0$ ,  $\text{Re}(s_9) < 0$ ) характеристического уравнения (7) для данной системы:

$$\begin{aligned} s_1 &= -5,07, & s_2 &= -2,68, & s_3 &= -2,24, \\ s_4 &= -11,74, & s_5 &= -9,77, \\ s_6 &= -0,12 - 5,36j, & s_7 &= -0,12 + 5,36j, \\ s_8 &= 0,87 - 7,12j, & s_9 &= 0,87 + 7,12j. \end{aligned}$$

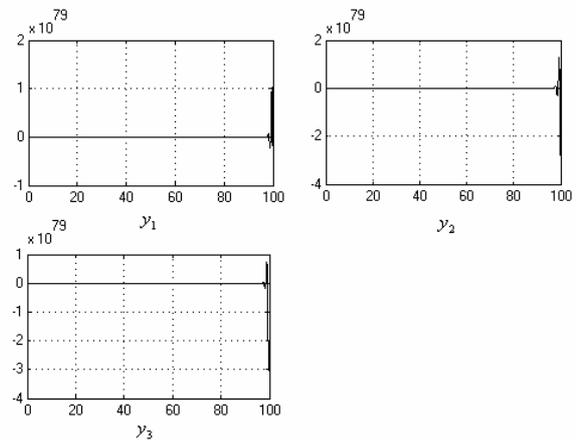


Рис. 11. Переходной процесс для второй системы

## ВЫВОДЫ

1. Разработана удобная для исследования динамических свойств векторно-матричная модель линейных систем координированного управления.

2. Предложены частотный и алгебраический методы исследования устойчивости линейных одноступенчатых систем координированного управления. Методы базируются на известных аналогичных методах для одноступенчатых многосвязных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами. Методы, обладая достоинствами, присущими частотным и алгебраическим методам, позволяют наглядным образом оценить влияние динамических свойств отдельных подсистем и связей между ними на устойчивость линейных одноступенчатых систем координированного управления.

3. Приведены примеры, иллюстрирующие применение предложенных частотного и алгебраического методов исследования устойчивости линейных одноступенчатых систем координированного управления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бесекерский, В. А.** Теория систем автоматического регулирования / В. А. Бесекерский, Е. П. Попов. М.: Наука, 1972. 768 с.
2. **Гусев, О. С.** Проектирование систем автоматического управления газотурбинных двигателей / О. С. Гусев, Н. К. Зайнашев, А. И. Иванов и др. М.: Машиностроение, 1981. 400 с.

3. **Ильясов, Б. Г.** Исследование устойчивости однотипных систем автоматического управления с голономными связями между подсистемами / Б. Г. Ильясов, Ю. С. Кабальнов // Автоматика и телемеханика. 1994. № 8. С. 82–90.

4. **Насибуллин, Ф. Г.** Координированное управление сложным технологическим процессом (на примере нефтеобрабатывающего производства) : дис.... канд. техн. наук / Ф. Г. Насибуллин. Уфа, 2000.

5. **Соболев, О. С.** Однотипные многосвязные системы регулирования / О. С. Соболев. М. : Энергия, 1973. 136 с.

## ОБ АВТОРАХ



**Кабальнов Юрий Степанович**, проф., зав. каф. инф. Дипл. инж. электронной техники (УАИ, 1971). Д-р техн. наук по управлению в технических системах (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. адаптивного и интеллектуального управления сложными объектами



**Маргамов Александр Валерьевич**, ст. преп. той же каф. Дипл. инж. по моделированию и иссл. операций в ОТС (УГАТУ, 2004). Канд. техн. наук по упр-ю в техн. системах (УГАТУ, 2007). Иссл. в обл. управления сложн. объектами



**Смирнова Елена Александровна**, асс., асп. той же каф. Дипл. преп. по математике и информатике (БГПУ, 2005). Готовит дис. по координированному упр-ю сложн. динамич. системами.