

А. Г. СТРИЖНЕВ, А. А. ШИХОВ

## СПОСОБЫ РЕДУЦИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ОБЪЕКТОВ УПРАВЛЕНИЯ, СОДЕРЖАЩИХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ И ФОРСИРУЮЩИЕ ЗВЕНЬЯ

НПООО «ОКБ ТСП»

*Предложены способы редуцирования моделей объектов управления, содержащих колебательные и форсирующие звенья, основанные на использовании модуля квадратного уравнения и коэффициента разложения, делающих их дискриминант равным или больше нуля. Способы позволяют учитывать изменения коэффициентов передачи в процессе редуцирования моделей объектов и провести предельное упрощение квадратных уравнений колебательных и форсирующих звеньев. Порядок редуцированных моделей объектов уменьшается, а их работа близко совпадает с исходной моделью. При этом значительно упрощается синтез корректирующих устройств, работа которых в составе систем управления осуществляется с перерегулированием (не превышающим 10–17%), которое может быть уменьшено выбором общего коэффициента усиления системы. Приведены примеры редуцирования реальных моделей объектов управления, синтеза цифровых корректирующих устройств и проверки их работы путем моделирования.*

**Ключевые слова:** объект управления, модель, колебательные и форсирующие звенья, редуцирование, синтез, корректирующее устройство, моделирование.

### Введение

При проектировании систем автоматического управления (САУ), содержащих непрерывные объекты управления (ОУ), обычно стремятся максимально упростить (редуцировать) их модели, сохранив при этом их основные динамические свойства. Такая процедура позволяет получить дифференциальное уравнение, описывающее реальный объект, как правило, второго порядка [1, 2] и тем самым облегчить расчет цифровых корректирующих устройств (ЦКУ). Существуют различные способы редуцирования моделей ОУ, однако на практике находят применения те из них, которые не требуют сложных аналитических расчетов. Наиболее просто это можно осуществить путем отбрасывания тех сомножителей модели ОУ, которые содержат наименьшие постоянные времени [1]. Другой путь заключается в замене постоянных времени одним суммарным запаздыванием и сокращении близких друг к другу нулей и полюсов передаточной функции объекта [1]. Такие подходы обеспечивают низкую точность редуцирования и не предусматривают изменение коэффициента

передачи модели ОУ. Редуцировать модель ОУ можно и путем сохранения присущего реальной модели значения частоты среза и фазочастотной характеристики на этой частоте [2]. В этом случае расчет получается сложным, результаты неточными, а редуцированная модель не отражает свойства полной модели. Существующие современные методы редуцирования объектов и систем [3] из-за сложности расчетов на практике находят ограниченное применение. Рассмотренные подходы имеют право на существование и не отрицают другие способы редуцирования моделей ОУ, которые разработаны и в дальнейшем будут рассмотрены.

### Способы редуцирования моделей объектов управления

Многие модели объектов управления содержат колебательные звенья вида:

$$G_1(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi Ts + 1} = \frac{\alpha}{s^2 + bs + a}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент усиления в установившемся состоянии;  $T$  – постоянная времени;  $\xi$  – коэффициент относительного демпфирования;  $\alpha = k/T^2$ ;  $a = 1/T^2$ ;  $b = 2\xi/T$  – коэффициенты.

Когда  $0 < \xi < 1$  и выполняется условие  $b^2 - 4a < 0$ , разложить колебательное звено (1) на два апериодических звена нельзя. Вместе с тем для многих практических применений требуется, пусть даже приближенно, редуцировать модель объекта, содержащего колебательное звено.

Наиболее просто это можно сделать путем определения комплексно сопряженных корней  $x = -b/2 \pm i\sqrt{(b/2)^2 - a}$  квадратного уравнения (1) и нахождения их модуля без учета знаков.

В результате выражение (1) преобразуется к виду:

$$G_2(s) = \frac{\alpha_1}{(s+m)^2}, \quad (2)$$

где  $m = \sqrt{(b/2)^2 + |(b/2)^2 - a|} = \sqrt{a}$  – модуль квадратного уравнения (1),  $\alpha_1 = \alpha m^2/a$  – коэффициент передачи.

Редуцировать колебательное звено можно и путем увеличения коэффициента  $b$  и уменьшения коэффициента  $a$  так, чтобы дискриминант квадратного уравнения (1) стал  $D = (\lambda b/2)^2 - (a/\lambda) \geq 0$ , где  $\lambda$  – коэффициент разложения. Откуда получим выражение для определения коэффициента разложения  $\lambda \geq \sqrt[3]{4a/b^2}$  и новые коэффициенты модели объекта  $a_1 = a/\lambda$ ,  $b_1 = b\lambda$ ,  $\alpha_1 = \alpha a_1/a$ . Причем, если выполнить условие  $\lambda \approx \sqrt[3]{4a/b^2}$ , то модель объекта можно представить в виде (2), где  $m = b_1/2$  и  $\alpha_1 = \alpha m^2/a$ , а если выполнить условие  $\lambda \gg \sqrt[3]{4a/b^2}$ , то модель объекта можно представить двумя апериодическими звеньями.

Проведенные процедуры позволяют в дальнейшем провести предельное редуцирование без аналитического вывода:

$$G_3(s) = \frac{\alpha_2}{s+2m}, \quad (3)$$

где  $\alpha_2 = 2\alpha m/a$ .

Многие модели объектов содержат не только колебательное, но и форсирующее звено первого порядка в виде:

$$G_4(s) = \frac{\alpha(s+r)}{s^2+bs+a}. \quad (4)$$

Из-за потери свойств объекта нельзя исключать форсирующее звено из состава модели. В данном случае можно редуцировать

только квадратное уравнение и получить модель ОУ в виде:

$$G_5(s) = \frac{\alpha_2(s+r)}{s+2m}, \quad (5)$$

где  $\alpha_2 = 2\alpha m/a$ .

Некоторые модели объектов содержат колебательное и форсирующее звено второго порядка:

$$G_6(s) = \frac{\alpha(s^2+ds+c)}{s^2+bs+a}. \quad (6)$$

Редуцировать модель (6) можно путем определения модулей квадратных уравнений  $n = \sqrt{c}$ ,  $m = \sqrt{a}$  и вычисления  $2n$ ,  $2m$ . В результате получим модель ОУ в виде:

$$G_7(s) = \frac{\alpha_3(s+2n)}{s+2m}, \quad (7)$$

где  $\alpha_3 = \alpha cm/an$ .

Редуцировать модель (6) можно и иначе. Представить числитель и знаменатель в виде  $s^2+ds+c = (s+m)(s+x_i)$  и  $s^2+bs+a = (s+m)^2$ , приравнять коэффициенты  $d = m + x_i$ ,  $c = mx_i$  и с учетом выполнения условий  $x_1 = d - m$ ,  $x_2 = c/m$  выбрать требуемую  $x_i$ . При этом предельно редуцированная модель объекта будет иметь вид:

$$G_8(s) = \frac{\alpha_4(s+x_i)}{s+m}, \quad (8)$$

где  $\alpha_4 = \alpha cm/ax_i$ .

Редуцировать модель объекта (6) можно по-другому. Представить числитель и знаменатель в виде  $s^2+ds+c = (s+n)^2$  и  $s^2+bs+a = (s+n)(s+x_i)$ , приравнять коэффициенты  $b = n + x_i$ ,  $a = nx_i$  и с учетом выполнения условий  $x_1 = d - m$ ,  $x_2 = c/m$  выбрать требуемую  $x_i$ . При этом предельно редуцированная модель объекта будет иметь вид:

$$G_9(s) = \frac{\alpha_5(s+n)}{s+x_i}, \quad (9)$$

где  $\alpha_5 = \alpha cx_i/an$ .

Для проверки предложенных способов осуществим редуцирование моделей реальных объектов управления.

### Примеры редуцирования моделей реальных объектов управления

*Пример 1.* Рассмотрим гидравлический привод, передаточная функция которого имеет вид:

$$M(s) = \frac{\alpha(s+r)}{s(s^2+bs+a)}, \quad (10)$$

где  $\alpha = 4,0797 \text{ с}^{-2}$ ,  $a = 48,2588 \text{ с}^{-2}$ ,  $b = 4,5877 \text{ с}^{-1}$ ,  $r = 1,6289 \text{ с}^{-1}$ .

Дискриминант  $D \equiv (b/2)^2 - a \approx -42,9971$  квадратного уравнения меньше нуля, и разложить колебательное звено на два апериодических звена нельзя.

Определим модуль квадратного уравнения (10)  $m = \sqrt{a} = 6,9469$ , вычислим  $2m = 13,8937$  и получим редуцированную модель объекта в виде:

$$M_1(s) = \frac{\alpha_1(s+r)}{s(s+2m)}, \quad (11)$$

где  $\alpha_1 = \alpha 2m/a = 1,1746$ .

Для проверки редуцирования были составлены схемы объектов [4–6], и осуществлено моделирование их работы. Результаты приведены на рис. 1. Работа объекта (10) и его редуцированной модели (11) близко совпадают (рис. 1, б).

*Пример 2.* Рассмотрим гидравлический привод, передаточная функция которого имеет другой вид:

$$M_2(s) = \frac{\alpha(s^2+ds+c)}{s(s^2+bs+a)}, \quad (12)$$

где  $\alpha = 0,148 \text{ с}^{-2}$ ,  $a = 56,25 \text{ с}^{-2}$ ,  $b = 6,0 \text{ с}^{-1}$ ,  $c = 110,2 \text{ с}^{-2}$ ,  $d = 3,36 \text{ с}^{-1}$ .

Дискриминанты  $D_1 \equiv (d/2)^2 - c = -107,3776$ ,  $D_2 \equiv (b/2)^2 - a = -47,25$  меньше нуля, и квадратные уравнения имеют два комплексно сопряженных корня.

Определим модули квадратных уравнений  $n = \sqrt{c} = 10,4976$ ,  $m = \sqrt{a} = 7,5$ , вычислим

$2n = 20,9952$ ,  $2m = 15$  и получим редуцированную модель объекта (12) в виде:

$$M_3(s) = \frac{\alpha_2(s+2n)}{s(s+2m)}, \quad (13)$$

где  $\alpha_2 = \alpha cm/an = 0,2072$ .

Разложим квадратные уравнения числителя и знаменателя (12) на множители  $s^2+ds+c = (s+m)(s+x_1)$  и  $s^2+bs+a = (s+m)^2$ , приравняем коэффициенты  $d = m+x_1$ ,  $c = mx_1$  и получим  $x_1 = d-m = -1,5$ ,  $x_2 = c/m = 14,6933$ . Определим коэффициенты передачи объекта

$$\alpha_3 = \frac{\alpha cm}{ax_1} = -1,4497, \quad \alpha_4 = \frac{\alpha cm}{ax_2} = 0,1480$$

и с учетом физической реализации получим редуцированную модель объекта:

$$M_4(s) = \frac{\alpha_4(s+x_2)}{s(s+m)}. \quad (14)$$

Разложим квадратные уравнения числителя и знаменателя (12) на множители  $s^2+ds+c = (s+n)^2$  и  $s^2+bs+a = (s+n)(s+x_3)$ , приравняем коэффициенты  $b = n+x_3$ ,  $a = nx_3$  и получим  $x_3 = b-n = -4,4976$ ,  $x_4 = a/n = 5,3584$ . Определим коэффициенты передачи объекта

$$\alpha_5 = \frac{\alpha cx_3}{an} = -0,1242, \quad \alpha_6 = \frac{\alpha cx_4}{an} = 0,1480$$

и с учетом физической реализации получим редуцированную модель объекта:

$$M_5(s) = \frac{\alpha_6(s+n)}{s(s+x_4)}. \quad (15)$$

Для проверки редуцирования были составлены схемы объектов [4–6], и осуществлено моделирование их работы. Результаты приведены на рис. 2. Работа объекта (12) и его редуцированных моделей (13–15) близко совпадают (рис. 2, б).

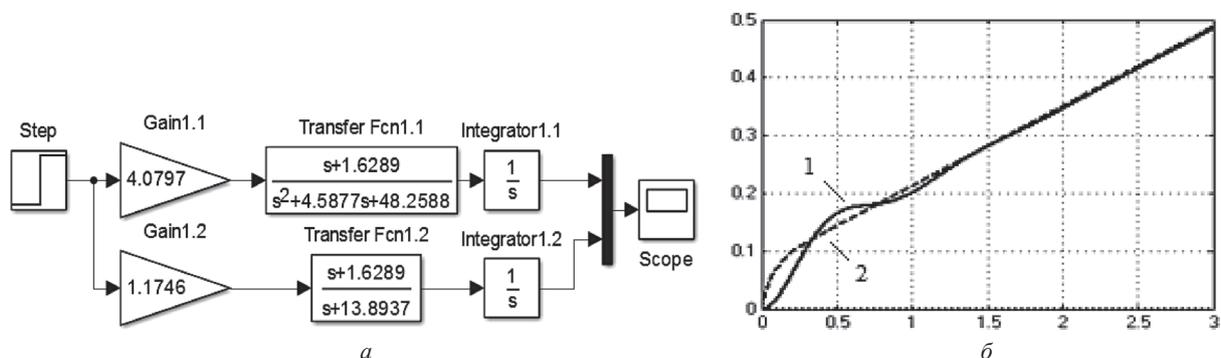


Рис. 1. Работа объектов: а – схема моделирования; б – результаты моделирования: 1 – полная модель; 2 – редуцированная модель

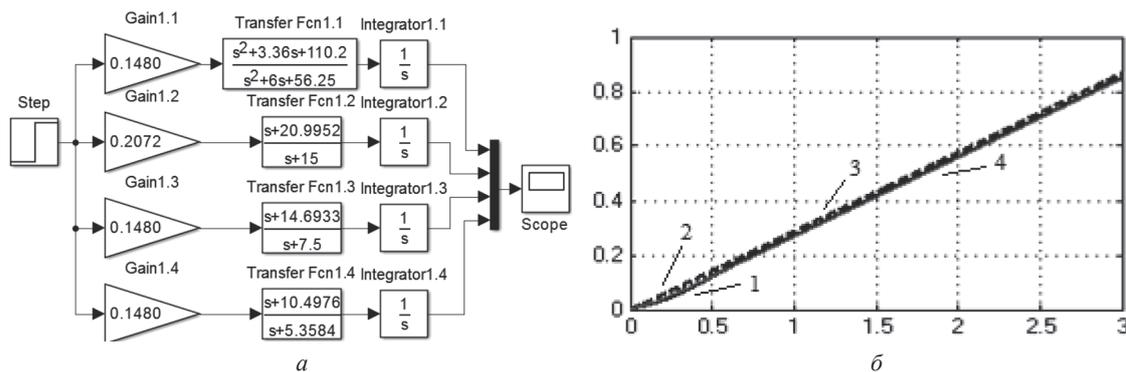


Рис. 2. Работа объектов: а – схема моделирования; б – результаты моделирования: 1 – полной модели; 2–4 – редуцированных моделей

Окончательная проверка работы моделей может быть проведена в составе САУ при наличии соответствующих ЦКУ. С этой целью для объектов (10–15) необходимо осуществить синтез ЦКУ.

### Синтез цифровых корректирующих устройств

Для синтеза ЦКУ и обеспечения требуемых динамических свойств САУ можно использовать различные типы корректирующих устройств (регуляторов) [1, 7–9]: цифровые ПИД-регуляторы, оптимальные по быстродействию цифровые регуляторы, цифровые регуляторы на основе нечеткой логики функционирования, цифровые регуляторы в цепи гибкой обратной связи и др. С учетом, что передаточные функции (10–15) содержат форсирующие звенья, которые ограничивают применение многих известных корректирующих устройств, в дальнейшем будет использован метод придания одноконтурной замкнутой САУ требуемых фильтрующих свойств [10]. Суть метода состоит в применении специального ЦКУ, который обеспечивает требуемую полосу пропускания и показатели качества работы следящей системы. Для определения передаточной функции КУ в аналоговом виде, нужно использовать выражение:

$$W(s) = \frac{F(s)}{D(s)[1 - F(s)]}, \quad (16)$$

где  $W(s)$  – передаточная функция КУ,  $D(s)$  – передаточная функция объекта управления,  $F(s)$  – передаточная функция эталонного фильтра низкой частоты ФНЧ.

Применительно к объектам (10, 12) использован ФНЧ  $F(s) = 1/(Ts + 1)^3$ ,  $T = 0,1699$  с,

$\omega = 3$ ,  $N = 0,8909$ , и определены передаточные функции КУ в аналоговом виде:

$$V_{10}(s) = V_0 \frac{s^2 + c_1s + c_2}{s^3 + d_1s^2 + d_2s + d_3},$$

$$V_{12}(s) = V_0 \frac{s^2 + c_1s + c_2}{s^4 + d_1s^3 + d_2s^2 + d_3s + d_4}. \quad (17)$$

Применяя к выражениям (17) билинейную аппроксимацию (преобразование Тастина) [11]

$$s \approx \frac{2}{h} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}},$$

где  $h$  – шаг квантования, получены передаточные функции ЦКУ:

$$W_{10}(z) = K_0 \frac{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}},$$

$$W_{12}(z) = K_0 \frac{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3} + a_4z^{-4}}. \quad (18)$$

Применительно к объектам (11, 13–15) использован ФНЧ  $F(s) = 1/(Ts + 1)^2$ ,  $T = 0,2145$  с,  $\omega = 3$ ,  $N = 0,8409$ , и определены передаточные функции КУ в аналоговом и цифровом виде:

$$V_{11,13-15}(s) = V_0 \frac{s + c_1}{s^2 + d_1s + d_2},$$

$$W_{11,13-15}(z) = K_0 \frac{1 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}}. \quad (19)$$

Таблица. Параметры КУ для различных объектов

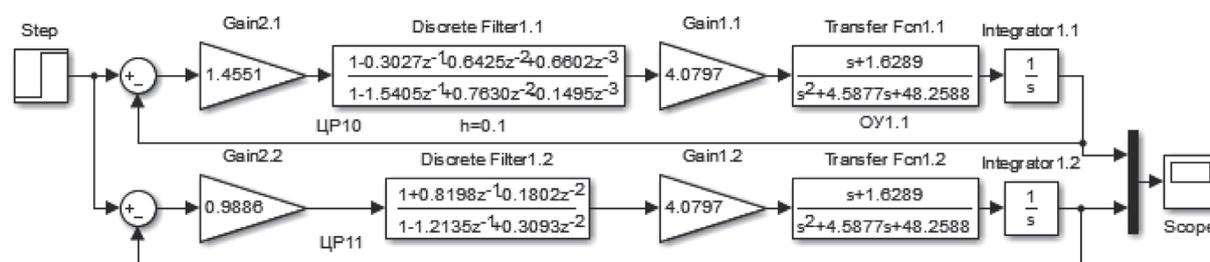
№ объекта	Параметры аналоговых КУ	Параметры цифровых КУ
10	$V_0 = 49,9431, c_1 = 4,5877, c_2 = 48,2588, d_1 = 19,2821, d_2 = 132,6333, d_3 = 169,2069.$	$b_1 = -0,3027, b_2 = -0,3027, b_3 = -0,6425, b_4 = 0,6602, a_1 = -1,5405, a_2 = 0,7630, a_3 = -0,1495, h = 0,1 c.$
11	$V_0 = 18,4981, c_1 = 13,8937, d_1 = 10,9515, d_2 = 15,1856.$	$K_0 = 0,9886, b_1 = 0,8198, b_2 = -0,1802, a_1 = -1,2135, a_2 = 0,3093, h = 0,1 c.$
12	$V_0 = 1376,71, c_1 = 6, c_2 = 56,25, d_1 = 21,01, d_2 = 273,39, d_3 = 2294,41, d_4 = 11447,36.$	$K_0 = 1,6033, b_1 = 0,8069, b_2 = -0,8026, b_3 = -0,0260, b_4 = 0,5835, a_1 = -1,6949, a_2 = 1,6370, a_3 = -0,7069, a_4 = 0,1350, h = 0,1 c.$
13	$V_0 = 104,86, c_1 = 15, d_1 = 30,3178, d_2 = 195,73.$	$K_0 = 3,0532, b_1 = 0,8571, b_2 = -0,1429, a_1 = -0,3399, a_2 = -0,0088, h = 0,1 c.$
14	$V_0 = 146,81, c_1 = 7,5, d_1 = 24,0159, d_2 = 136,98.$	$K_0 = 3,9686, b_1 = 0,5455, b_2 = -0,4525, a_1 = -0,5171, a_2 = 0,0557, h = 0,1 c.$
15	$V_0 = 146,81, c_1 = 5,3584, d_1 = 19,8202, d_2 = 97,87.$	$K_0 = 4,1630, b_1 = 0,4226, b_2 = -0,5774, a_1 = -0,6757, a_2 = 0,1135, h = 0,1 c.$

Параметры КУ для различных объектов приведены в таблице.

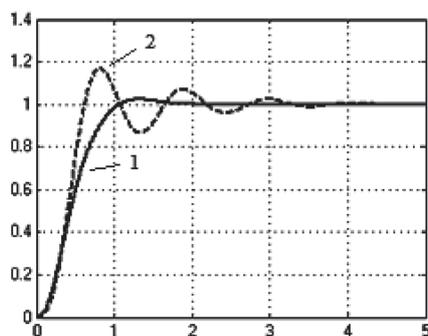
Для проверки работы регуляторов  $W_{10,11}(z)$  были составлены схемы САУ [4–6], и осуществлено моделирование их работы. Результаты приведены на рис. 3. Работа САУ с регуляторами  $W_{10,11}(z)$  близко совпадают (рис. 3, б). При работе САУ с регулятором  $W_{11}(z)$ , рассчитанным на редуцированную модель объекта (10), наблюдается перерегуливание не более 17%,

которое может быть уменьшено выбором общего коэффициента усиления  $K_0$ .

Для проверки работы регуляторов  $W_{12-15}(z)$  были составлены схемы САУ [4–6], и осуществлено моделирование их работы. Результаты приведены на рис. 4. Работа САУ с регуляторами  $W_{12-15}(z)$  близко совпадают (рис. 4, б), а перерегуливание не превышает 10%, которое может быть уменьшено выбором общего коэффициента усиления  $K_0$ .



а



б

Рис. 3. Работа САУ: а – схема моделирования; б – результаты моделирования: 1 – ЦР10; 2 – ЦР11

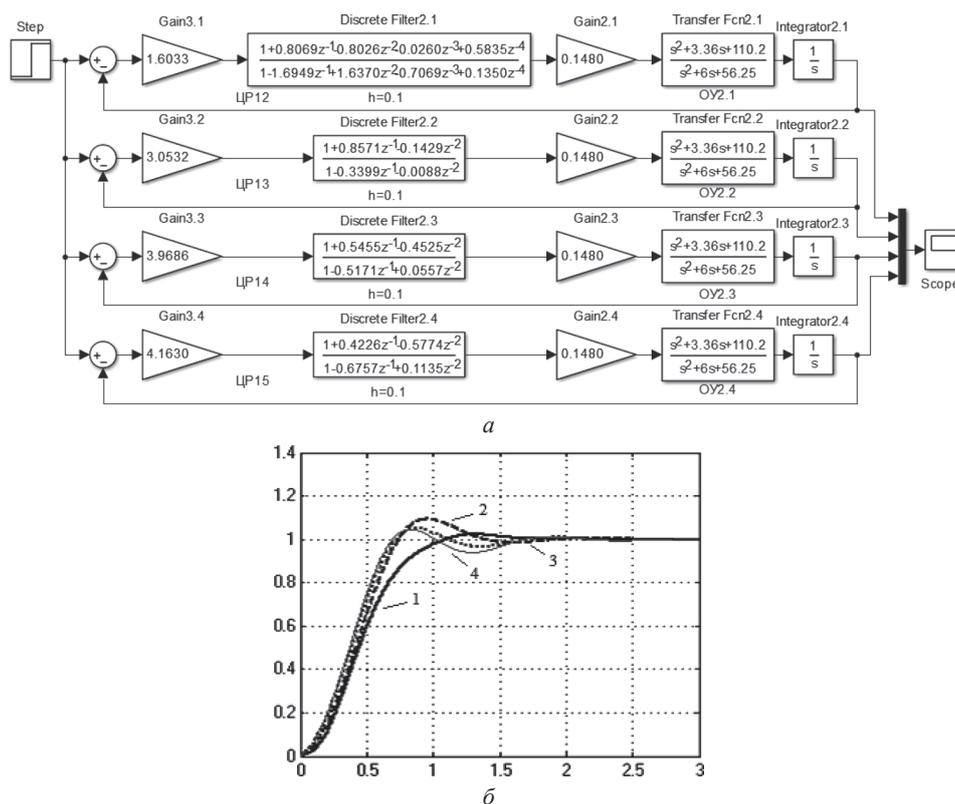


Рис. 4. Моделирование работы САУ: *a* – схема моделирования; *б* – результаты моделирования: 1 – ЦР12; 2 – ЦР13; 3 – ЦР14; 4 – ЦР15

### Заключение

Разработаны, проверены и предложены к применению новые способы редуцирования моделей объектов, которые содержат колебательные и форсирующие звенья первого и второго порядка. Новым является то, что редуцирование колебательных звеньев осуществляется последовательным представлением сначала апериодическим звеном второго порядка (с использованием модуля квадратного уравнения  $m = \sqrt{a}$ ) с последующей заменой его апериодическим звеном с удвоенной постоянной времени. Редуцировать колебательные звенья можно также путем увеличения коэффициента  $b$  и уменьшения коэффициента  $a$  так, чтобы дискриминанты квадратных уравнений стали  $D = (\lambda b/2)^2 - (a/\lambda) \geq 0$ , где  $\lambda \geq \sqrt[3]{4a/b^2}$  – коэффициент разложения. Во всех случаях требуется уточнить коэффициент передачи объекта, используя выражения  $\alpha_1 = \alpha m^2/a$ ,  $\alpha_2 = \alpha 2m/a$ .

При наличии форсирующего звена первого порядка не следует его исключать из модели, т.к. это приведет к потере свойств объекта. В случае наличия форсирующего звена второго порядка, его можно упростить, по аналогии с колебательным звеном, или разложить квадратные уравнения на множители с последующим их сокращением. Во всех случаях требуется уточнить коэффициент передачи объекта используя выражения  $\alpha_3 = \alpha cm/ax_i$ ,  $\alpha_4 = \alpha cx_i/an$ .

Работа редуцированных моделей объектов близко совпадает (рис. 1, *б*; рис. 2, *б*), а их порядок уменьшается. При этом значительно упрощается синтез цифровых корректирующих устройств, качество работы которых в составе САУ остается приемлемым (рис. 3, *б*; рис. 4, *б*) с перерегулированием не превышающим 10–17%, которое может быть уменьшено выбором общего коэффициента усиления цифрового корректирующего устройства  $K_0$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гостев В. И. Системы автоматического управления с цифровыми регуляторами: Справочник / В. И. Гостев, В. К. Степков. – К.: Радиоаматор, 1998. – 704 с.
2. Зимчук И. В. Редукция моделей объектов управления для синтеза простых регуляторов / И. В. Зимчук // Информатика управление и вычислительная техника: сборник научных трудов. – 2014. – № 60. – С. 122–132.

3. Романова И. К. Современные методы редукции нелинейных систем и их применение для формирования моделей движущихся объектов / И. К. Романова // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». – 2012. – С. 122–133.
4. Терехин В. В. Основы моделирования в MATLAB. Simulink: учеб. пособие в 2 ч. Ч. 2 / В. В. Терехин. – Новокузнецк: Кузбассвузиздат, 2004. – 376 с.
5. Tewari A. Modern control design with MATLAB and Simulink / A. Tewari. – Weinheim: Wiley, 2002. – 503 p.
6. Nuruzzaman M. Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists / M. Nuruzzaman. – Bloomington: Author House, 2005. – 240 p.
7. Гостев В. И. Синтез цифровых регуляторов систем автоматического управления параметрами теплоэнергетических объектов / В. И. Гостев, В. В. Крайнев, С. Н. Скуртов. – К: Радиоаматор, 2007. – 264 с.
8. Гостев В. И. Синтез нечетких регуляторов систем автоматического управления / В. И. Гостев. – К: Радиоаматор, 2005. – 708 с.
9. Стрижнев А. Г. Синтез цифрового регулятора, включенного параллельно единичной обратной связи / А. Г. Стрижнев, М. К. Хаджинов, А. Н. Русакович // Доклады БГУИР. – 2014. – № 4 (82). – С. 80–86.
10. Стрижнев А. Г. Метод придания одноконтурной замкнутой системе автоматического управления требуемых фильтрующих свойств / А. Г. Стрижнев // Системный анализ и прикладная информатика. – 2016. – № 4(12) – С. 31–37.
11. Герман-Галкин С. Г. Цифровые электроприводы с транзисторными преобразователями / С. Г. Герман-Галкин, В. Д. Лебедев, Б. А. Марков, Н. И. Чичерин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.

#### REFERENCE

1. Gostev V. I. Automatic Control Systems within Digital Controllers: handbook / V. I. Gostev, V. K. Steklov. – K.: Radioamator, 1998. – 704 p.
2. Zimchuk I. V. Reduction of Control Objects Models for Synthesis of Simple Controllers / I. V. Zimchuk // Informatics, Controlling and Computer Science: Collection of Scientific Papers. – 2014. – no. 60 – P. 122–132.
3. Romanova I. K. Modern Methods of Reduction of Nonlinear Systems and Their Implementation in Formation of Moving Objects Models / I. K. Romanova // Herald of MGTU name of N. E. Baumana. Ser. «Mashinostroenie». – 2012. – P. 122–133.
4. Terekhin V. V. Fundamentals of Modeling in MATLAB Simulink: tutorial in 2 p. P. 2 / V. V. Terekhin. – Novokuznetsk: Kuzbassvuzizdat, 2004. – 376 p.
5. Tewari A. Modern control design with MATLAB and Simulink / A. Tewari. – Weinheim: Wiley, 2002. – 503 p.
6. Nuruzzaman M. Modeling and Simulation in Simulink for Engineers and Scientists / M. Nuruzzaman. – Bloomington: Author House, 2005. – 240 p.
7. Gostev V. I. Synthesis of Digital Controllers for Closed Loop Control Systems of Heat-Power Engineering Objects' Parameters / V. I. Gostev, V. V. Krainev, S. N. Skurtov. – K.: Radioamator, 2007. – 264 p.
8. Gostev V. I. Synthesis of Fuzzy Logic Controllers for Closed Loop Control Systems / V. I. Gostev. – K.: Radioamator, 2005. – 708 p.
9. Stryzhniou A. G. Synthesis of the Digital Controller in the Reverse Path with Additional Unity Feedback / A. G. Stryzhniou, M. K. Khajynau, A. N. Rusakovich // Reports of BSUIR. – 2014. – no. 4(82). – P. 80–86.
10. Stryzhniou A. G. The Method of Imparting Desired Filtering Properties for Closed Loop Control System / A. G. Stryzhniou // System analysis and applied information science – 2016. – no. 4(12) – P. 31–37.
11. German-Galkin S. G. Digital servo drives with transistor inverters / S. G. German-Galkin, V. D. Lebedev, B. A. Markov, N. I. Chicherin. – L.: Energoatomizdat, 1986. – 248 p.

Поступила  
10.10.2018

После доработки  
25.02.2019

Принята к печати  
25.03.2019

*Stryzhnev A., Shykhau A.*

## METHODS OF REDUCTION OF CONTROL OBJECTS MODELS CONTAINING OSCILLATING AND FORCING LINKS

*Scientific Production Limited Liability Company «OKB TSP»*

*Methods of reduction of control objects models containing oscillating and forcing links are proposed. Methods are based on using of quadratic equation modulus and coefficient of factorization that makes links discriminants equal or more than zero. Methods allow taking into account transfer factors alterations during reduction of objects models ant to maximum simplify quadratic equations of oscillating and forcing links. The order of reduced objects models is decreased and models behavior closely agrees with behavior of the original model. In that case synthesis of controllers is essentially simplified. Such controllers provide slight overshoot (less than 10–17%) during the work within control system. It can be reduced by changing of system gain. Examples of reduction of real control objects models and examples of synthesis of digital controllers and results of modelling are given.*



**Стрижнев Александр Гаврилович**, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник НПООО «ОКБ ТСП». Специалист в области систем автоматического управления с цифровыми регуляторами; цифровых следящих систем; управления гидроприводом, двигателями переменного и постоянного тока; систем стабилизации и горизонтирования. Опубликовано более 70 работ в научных журналах и трудах конференций. Автор ряда изобретений и патентов. Подготовил 2 кандидата наук.

Тел.: +375 (029) 276-70-07. E-mail: strizhnev.ag@gmail.com.

**Stryzhnev Aliaksandr Gavrilovich**, Cand. Tech. Sci., associate professor, the leading research engineer of SPLLC «OKB TSP». The expert in the field of automatic control systems, digital servo systems, hydraulic drives, AC and DC motors control, stabilization and leveling systems. He is author and coauthor more than 70 papers in scientific journals, conference proceedings. He has number of certificates and patents.

Tel.: +375 (29) 276-70-07. E-mail: strizhnev.ag@gmail.com.



**Шихов Алексей Александрович**, ведущий инженер НПООО «ОКБ ТСП». Специалист в области встраиваемых систем; систем автоматического управления с цифровыми регуляторами; цифровых следящих систем; управления сервоприводом, гидроприводом, двигателями постоянного тока; шаговыми двигателями; систем стабилизации и горизонтирования. Опубликовано более 20 работ в научных журналах и трудах конференций.

Тел.: +375 (25) 955-22-86. E-mail: shihovalex@gmail.com.

**Shykhau Aliaksei Aliksandravich**, the lead engineer of SPLLC «OKB TSP». The expert in the field of embedded systems, automatic control systems, digital servo systems, hydraulic drives, DC and stepper motors control, stabilization and leveling systems. He is author and coauthor more than 20 papers in scientific journals, conference proceedings.

Tel.: +375 (29) 955-22-86. E-mail: shihovalex@gmail.com.