

## ДВУХКОНТУРНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ОБОБЩЕННЫМ ПАРАМЕТРОМ

**Б.К. Чостковский<sup>1</sup>, В.Ю. Денисов<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup>ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»  
443009, г. Самара, ул. Земеца, 18  
E-mail: vladenisov63@gmail.com

*Рассматривается использование корректирующих и межконтурных цепей с применением различных видов коррекции и регуляторов в двухконтурной системе управления обобщенным параметром. Исследуются различные методы оптимизации межконтурной связи.*

**Ключевые слова:** многоконтурные системы, обобщенный параметр, оптимизация регуляторов, межконтурные системы координации, корректирующие цепи, межконтурные регуляторы.

При автоматизации сложных технических процессов обычно реализуется ряд локальных САУ с частными параметрами качества и выявляется обобщенный параметр, формирующийся как взвешенная сумма частных параметров [1, 2].

Вследствие наличия множества технологических параметров, которые могут повлиять на качество и характеристики готовой продукции, предлагается ввести некоторый обобщенный параметр, по которому можно будет судить о качестве изготавливаемой продукции на определенных этапах технологического производства.

Рассмотрим двухконтурную систему управления обобщенным параметром. Данная система состоит из медленнодействующего и быстродействующего контуров, на выходах которых формируются некоторые частные параметры, а на выходе системы – обобщенный параметр качества  $P$ . Целью оптимального управления является приближение выхода системы (обобщенного параметра), равного взвешенной сумме частных параметров, к заданному значению  $P_0$  и минимизация времени переходного процесса. С учетом предполагаемой цифровой реализации системы представим ее в дискретном виде (рис. 1.)

На рис. 1, 2, 5 введены следующие обозначения:  $x_1$  и  $x_2$  – задающие воздействия локальных САУ;  $G_{p1}(z)$  и  $G_{p2}(z)$  – передаточные функции регуляторов;  $G_{o1}(z)$  и  $G_{o2}(z)$  – передаточные функции объектов управления;  $f_1$  и  $f_2$  – возмущающее воздействие;  $y_1$  и  $y_2$  – выходные воздействия локальных САУ;  $P$  – обобщенный параметр;  $P_0$  – заданное значение обобщенного параметра;  $\Delta P$  – отклонение от заданного значения;  $K_1$  и  $K_2$  – коэффициенты чувствительности обобщенного параметра системы к частным параметрам  $y_1$  и  $y_2$ .

Инерционность объектов управления приводит к тому, что при появлении воз-

мушающих воздействий в контурах формируются возмущенные процессы значительной длительности. В результате возникают достаточно длительные отклонения обобщенного параметра  $P$  от заданного значения  $P_0$ .

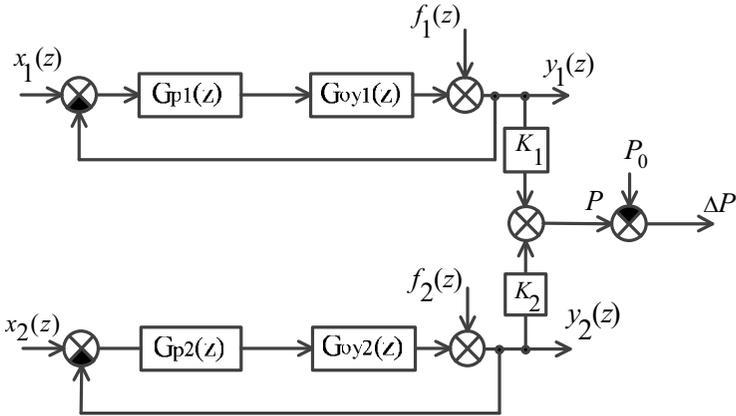


Рис. 1. Структурная схема двухконтурной непрерывной системы

С учетом того, что объекты управления обладают, как правило, разной инерционностью, предположим, что большей инерционностью обладает объект управления 1-го контура и поэтому назовем 1-й контур медленнодействующим, а 2-й – быстродействующим.

Для повышения качества управления по обобщенному параметру между данными двумя локальными контурами предлагается вводить межконтурные связи, которые позволят использовать быстродействующий контур для компенсации влияния на обобщенный параметр возмущенного процесса медленнодействующего контура [1].

Рассмотрим двухконтурную систему управления обобщенным параметром, показанную на рис. 2.

В качестве структурного способа повышения эффективности локальной САУ предлагается введение корректирующей цепи, которая из воздействия отклонения (динамической ошибки) более инерционного контура управления формирует отклонение задающего воздействия быстродействующего контура. При этом в течение возмущенного переходного процесса в медленнодействующем (первом) контуре  $\Delta y_1(z)$  в быстродействующем (втором) контуре возникает воздействие отклонения  $\Delta y_2(z)$ , которое компенсирует влияние  $\Delta y_1(z)$  на  $P$ . Так, на рис. 2 показан примерный вид графиков возмущенного процесса медленнодействующего контура и управляемого процесса быстродействующего контура, возникающего при оптимальной межконтурной связи и минимизирующего остаточную ошибку управления по обобщенному параметру.

При исследовании использовались дискретные передаточные функции элементов системы:

$$\begin{aligned}
 G_{oy1}(z) &= \frac{0.06 \cdot z^{-1}}{1 - 0.05 \cdot z^{-1}} \cdot z^{-10}; & G_{oy2}(z) &= \frac{0.02 \cdot z^{-1}}{1 - 0.81 \cdot z^{-1}} \cdot z^{-1}; \\
 G_{p1}(z) &= \frac{1.6 - 1.3 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}}; & G_{p2}(z) &= \frac{2.15 - 1.65 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

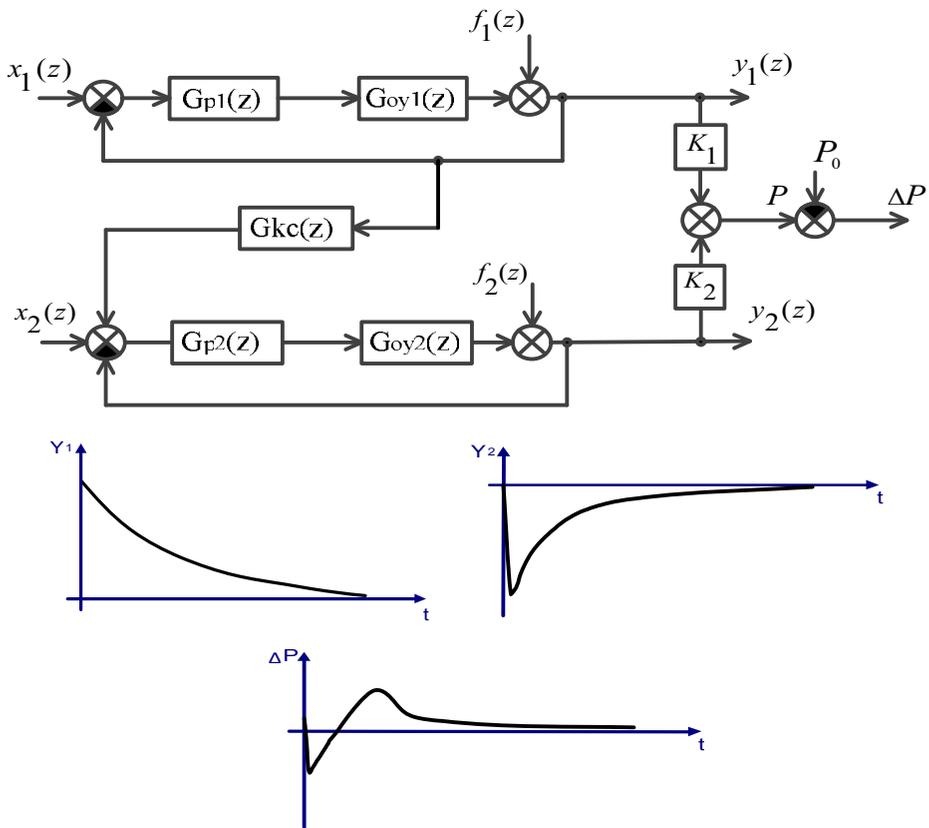


Рис. 2. Двухконтурная САУ с введением корректирующей цепи:  
 $G_{kc}(z)$  – передаточная функция корректирующей цепи

В качестве данного примера была взята система управления диаметром и диэлектрической проницаемостью пористой кабельной изоляции, ошибки которых приводят к отклонениям волнового сопротивления кабеля, вызывающим частичные отражения, проходящие по кабелю электромагнитной волны передаваемого сигнала [1]. Если чувствительности обобщенного параметра к частным различны, это может быть учтено путем соответствующей коррекции параметров межконтурной связи на последнем этапе проектирования системы.

Были проведены исследования данной системы при введении различных корректирующих цепей (ПД, ПИД).

Цифровой аналог ПД-регулятора:

$$G(z) = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}}, \quad (2)$$

$$\text{где } q_0 = Kp(1 + \frac{T\partial}{T_0}); \quad q_1 = -Kp(1 + \frac{2T\partial}{T_0});$$

$Kp, T\partial$  – параметры непрерывного ПД – регулятора;  $T_0$  – интервал квантования по времени в дискретной САУ.

Цифровой аналог ПИД-регулятора:

$$G(z) = \frac{q_0 + q_1 \cdot z^{-1} + q_2 \cdot z^{-2}}{1 - z^{-1}}, \quad (3)$$

$$\text{где } q_0 = Kp(1 + \frac{T\delta}{T_o}); \quad q_1 = -Kp(1 + \frac{T_o}{T_u} + \frac{2T\delta}{T_o}); \quad q_2 = \frac{Kp \cdot T\delta}{T_o};$$

$Kp, T_u, T\delta$  – параметры непрерывного ПИД-регулятора.

На рис. 3, 4 показаны результаты исследования динамических характеристик системы с межконтурными связями различных типов, где параметры схемы (см. рис. 2)  $K_1$  и  $K_2$  приняты единичными.

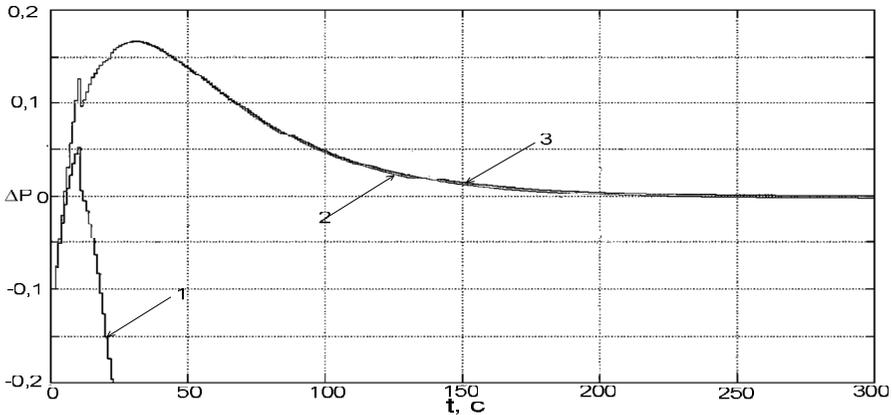


Рис. 3. Переходные процессы по выходу  $\Delta P$  с применением ПД-корректирующей цепи:

- 1 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,1$ ,  $q_1 = -0,2$ ;
- 2 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,00105$ ,  $q_1 = -0,002$ ;
- 3 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,0000105$ ,  $q_1 = -0,000025$

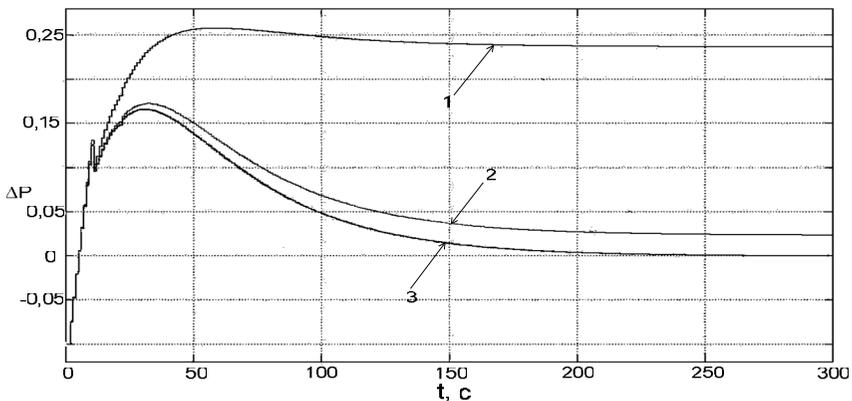


Рис. 4. Переходные процессы по выходу  $\Delta P$  с применением ПИД-корректирующей цепи:

- 1 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,0101$ ,  $q_1 = 0,019$ ,  $q_2 = 0,00002$ ;
- 2 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,0011$ ,  $q_1 = 0,0019$ ,  $q_2 = 0,00002$ ;
- 3 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,00011$ ,  $q_1 = 0,00019$ ,  $q_2 = 0,000002$

Начальные значения настроек  $q_i$  были рассчитаны в соответствии с зависимостями (2) и (3), где параметры непрерывных регуляторов были подобраны обеспечивающими устойчивость систем известными методами. Далее все параметры регуляторов подвергались оптимальной настройке методом Гаусса – Зейделя с целью минимизации суммы квадратов ошибки управления.

При анализе рассмотренных выше переходных процессов по выходу  $\Delta P$  можно сделать следующий вывод. Если требуется сокращение времени переходного процесса по выходу  $\Delta P$  и можно пренебречь некоторым возрастанием отражения электромагнитной волны в кабеле, то рекомендуется использовать ПИД-корректирующую цепь.

Наиболее эффективным путем минимизации ошибки обобщенного параметра является введение в систему 3-го контура (межконтурной системы координации). Объектом управления третьего контура является описанный уже быстродействующий контур, а источником возмущающего воздействия является медленнодействующий контур (рис. 5). Требуемые динамические характеристики межконтурной связи достигаются оптимизацией параметров вводимого межконтурного регулятора.

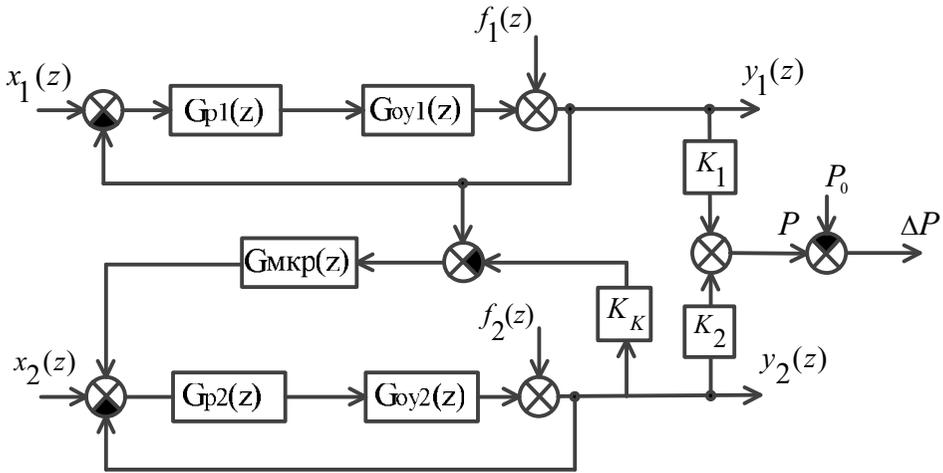


Рис. 5. Двухконтурная система управления обобщенным параметром с введением межконтурной связи:

$G_{mkr}(z)$  – передаточная функция межконтурной цепи;  
 $K_k$  – коэффициент коррекции

В качестве регулятора межконтурной системы координации предлагается выбрать ПД или ПИД-регулятор, с которым при появлении скачкообразного возмущающего воздействия в первом контуре обеспечивается компенсация влияния его динамической ошибки на обобщенный параметр  $P$ . В системе имеется дополнительный параметр – коэффициент коррекции ( $K_k$ ), который должен обеспечивать учет возможной разности чувствительностей  $\Delta P$  к  $y_1$  и  $y_2$ . При этом в отличие от схемы, предложенной в [1], данная система работоспособна и при разных  $K_1$  и  $K_2$ .

Были проведены исследования динамики системы при введении различных межконтурных регуляторов (ПД или ПИД, рассчитываемых по формулам (2), (3), (4) соответственно) на примере локальной САУ автоматической стабилизации частных параметров качества изготавливаемого коаксиального кабеля, когда  $y_1$  – диаметр изоляции  $D_u$  и  $y_2$  – диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_u$ . На рис. 6, 7 показаны ре-

зультаты исследования динамических характеристик системы с различными видами регуляторов межконтурной системы.

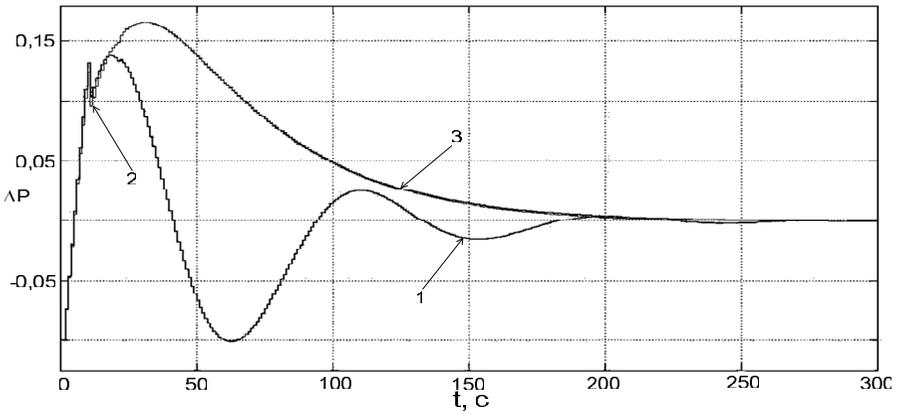


Рис. 6. Переходные процессы по выходу  $\Delta P$  с применением межконтурного ПИД-регулятора:

- 1 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,1$ ,  $q_1 = -0,2$ ;
- 2 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,00105$ ,  $q_1 = -0,002$ ;
- 3 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,0000105$ ,  $q_1 = -0,000025$

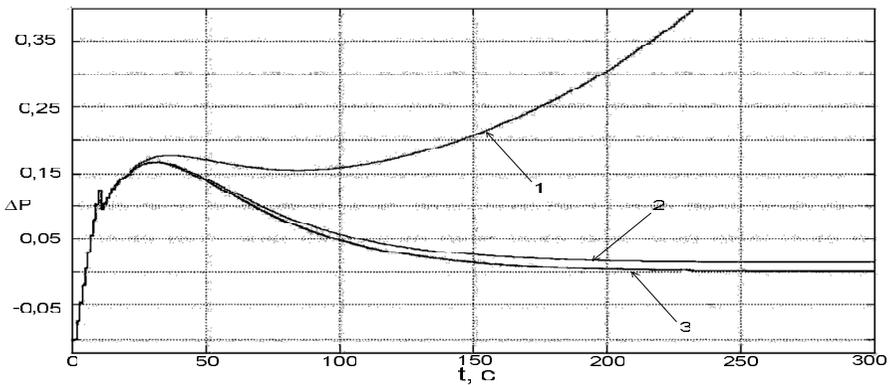


Рис. 7. Переходные процессы по выходу  $\Delta P$  с применением межконтурного ПИД-регулятора:

- 1 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,00201$ ,  $q_1 = 0,0039$ ,  $q_2 = 0,00004$ ;
- 2 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,000201$ ,  $q_1 = 0,00039$ ,  $q_2 = 0,000004$ ;
- 3 – переходный процесс с настройками  $q_0 = 0,000003$ ,  $q_1 = 0,0000192$ ,  $q_2 = 0,0000004$

После анализа переходных процессов, изображенных на рис. 6, 7, можно сделать следующие выводы. Если требуется резкое сокращение времени переходного процесса и отражения электромагнитной волны не должны превышать заданных значений, то рекомендуется использовать межконтурный ПИД-регулятор (см. рис. 6) с настройками параметров, соответствующими переходному процессу под номером 3. Если отражение электромагнитной волны не должно превышать заданных значений и время переходного процесса должно быть в пределах заданной нормы, то рекомендуется использовать межконтурный ПИД-регулятор (см. рис. 7) с параметрами, соответствующими переходному процессу под номером 2.

Для достижения максимальной эффективности управления в описанной 3-контурной системе следует оптимизировать параметры межконтурной связи.

Оптимизировать межконтурную связь предлагается по интегральному критерию качества – улучшенному интегральному критерию:

$$J = \int_0^{\infty} [e^2(t) + T^2 \dot{y}^2(t)] dt, \quad (4)$$

где  $e^2(t) = (y(t) - y_{уст})^2$  – ошибка системы;  $T^2$  – время идеального переходного процесса;  $\dot{y}^2(t)$  – скорость изменения управляемого параметра. При реализации межконтурной связи посредством регулятора оптимизации подлежат его параметры, в частности  $K_p$ .

Найдем оптимальное значение общего коэффициента регулирования  $K_p$  на примере ПИД-регулятора из эквивалентной непрерывной системы. Передаточная функция ПИД-регулятора в непрерывной форме с общим коэффициентом регулирования имеет вид

$$W_{ПИД}(p) = K_p \frac{T_u p + T_\delta \cdot T_u p^2 + 1}{T_u p}, \quad (5)$$

где  $K_p$  – общий коэффициент регулирования;  $T_u$  – постоянная времени интегрирования;  $T_\delta$  – постоянная времени дифференцирования. Начальные значения параметров примем равными  $T_u = 0.005c$  и  $T_\delta = 0.002c$ .

Для оптимизации регуляторов на имитационной модели системы использовался программный пакет Matlab. Оптимальный переходный процесс изображен на рис. 8 (кривая 3).

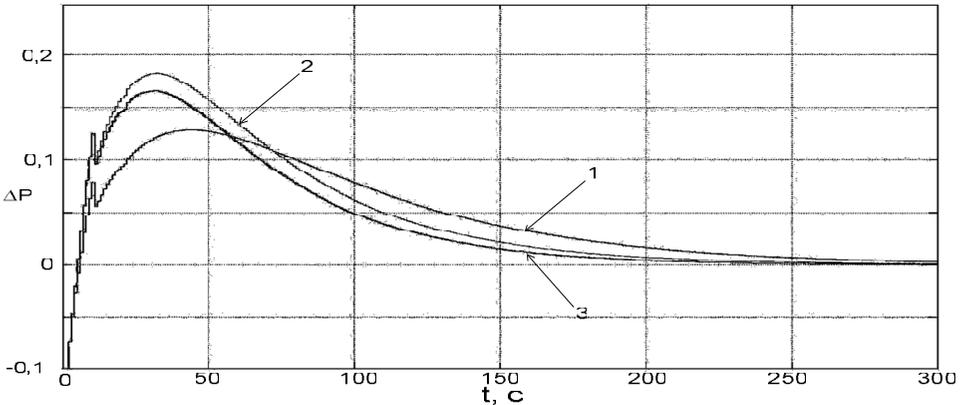


Рис. 8. Сравнение переходных процессов по ошибке системы:

1 – переходный процесс без введения межконтурных связей; 2 – переходный процесс с введением межконтурных связей; 3 – оптимальный переходный процесс с введением межконтурных связей

Оптимальный переходный процесс имеет скачок, что свидетельствует о возможном появлении отражения электромагнитной волны в кабеле.

В заключение можно отметить, что для повышения качества управления следует использовать оптимальные межконтурные связи в виде корректирующих цепей и межконтурных регуляторов, что обеспечивает многократное уменьшение интегральной ошибки управления по обобщенному параметру. А также если чувствительности 96

обобщенного параметра к частным различны, то следует это учитывать на последнем этапе проектирования системы соответствующей коррекцией параметра межконтурной связи Кк.

Из рис. 8 видно, что введение межконтурной САУ приводит к существенному уменьшению времени возмущенного процесса по обобщенному параметру приблизительно на 20 % при поступлении возмущающего воздействия в медленнодействующий контур.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи: Монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.: ил.
2. Чостковский Б.К. Моделирование и алгоритмизация процессов управления в стохастических системах с цифровыми регуляторами: Учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2005. – 134 с.
3. Образовательный математический сайт [Электронный ресурс]. Электрон. дан. – М.: 15.03.12. – Режим доступа <http://www.exponenta.ru>, свободный. Загл. с экрана – Яз. рус.

*Статья поступила в редакцию 19 сентября 2012 г.*

## DOUBLE-LOOP CONTROL SYSTEM by GENERALIZED PARAMETER

***B.K. Chostkovsky<sup>1</sup>, V.Y. Denisov<sup>2</sup>***

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

<sup>2</sup> State Research-and-Production Space Rocket Centre «TsSKB-Progress»  
18, Zemetza st., Samara, 443009

*Use of correcting and intercontour circuits with application of various kinds of correction and regulators in double-loop control system by generalized parameter is considered. Various methods of intercontour connection optimization are investigated.*

***Keywords:*** *multiloop system, generalized parameter, regulator optimization of intercontour coordination system, correcting circuit, intercontour regulators.*