

ОПТИМИЗАЦИЯ МНОГОСВЯЗНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СИМПЛЕКСНЫМ МЕТОДОМ

Б.К. Чостковский¹, В.Ю. Денисов², А.И. Дьяконов¹

¹ Самарский государственный технический университет
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² ФГУП ГНП РКЦ «ЦСКБ-Прогресс»
443009, г. Самара, ул. Земеца, 18

E-mail: VlaDenisov@gmail.com

Рассматривается использование различных видов перекрестного регулирования в многосвязной системе управления обобщенным параметром, симплексного метода оптимизации параметров регулятора.

Ключевые слова: многосвязные системы, перекрестное регулирование, межконтурные регуляторы, обобщенный параметр, регулярный симплекс.

Данная статья является продолжением исследования многосвязной управляемой системы, в которой определено простейшее структурное решение построения системы двухсвязного регулирования [1].

В работе решается задача синтеза структуры и оптимизации параметров системы управления многосвязным объектом управления, управляемая координата которой, в дальнейшем называемая обобщенным параметром P , формируется как взвешенная алгебраическая сумма управляемых координат двух односвязных объектов управления, в частности – как их разность. Причем каждый односвязный объект охвачен обратной связью, реализующей контур автоматической стабилизации управляемой координаты данного объекта y_i на основе пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) закона управления.

Особенностью описанной двухконтурной системы (рис. 1) является существенное различие времени регулирования контуров, которое обусловлено различной инерционностью односвязных объектов, определяемой их физической природой. Пусть, например, большей инерционностью обладает объект с передаточной функцией (ПФ) W_{oy2} .

Примером такой двухконтурной системы является система автоматической стабилизации параметров пористой изоляции, накладываемой методом экструзии на внутренний проводник изготавливаемого коаксиального кабеля [2].

В качестве выходной координаты медленнодействующего контура y_2 может рассматриваться степень пористости экструдированной изоляции, регулируемая путем изменения потока азота, вводимого в расплав полиэтилена в цилиндре экструдера. В качестве выходной координаты быстродействующего контура y_1 может рассматриваться диаметр изоляции на выходе головки экструдера, регулируемый путем изменения скорости вращения шнека экструдера.

Вариации пористости и диаметра изоляции определяют вариации первичных па-

Борис Константинович Чостковский (д.т.н.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

Владимир Юрьевич Денисов, инженер-программист.

Артем Игоревич Дьяконов, магистрант.

раметров передачи изготавливаемого кабеля, которые, суммируясь, образуют величину волнового сопротивления кабеля, рассматриваемого как обобщенный параметр P [2].

Можно отметить, что увеличение степени пористости изоляции приводит к увеличению волнового сопротивления, а увеличение диаметра – к его уменьшению, что соответствует вычитанию управляемых координат $y_1 - y_2$, как это и показано на рис. 1. Поэтому можно предложить введение межконтурной связи, которая при появлении отклонения степени пористости обеспечивает соответствующее отклонение диаметра изоляции, в результате чего происходит взаимная компенсация их вкладов в волновое сопротивление и оно остается равным заданному номинальному значению.

Таким образом, целью управления многосвязным объектом, показанным на рис. 1, является стабилизация его управляемой координаты P при изменении как задающих, так и возмущающих воздействий двухконтурной системы.

Для достижения данной цели предлагается введение межконтурной связи, благодаря которой при появлении возмущенного процесса и ошибки управления в медленнодействующем контуре формируется эквивалентная ошибка управления в быстродействующем контуре и происходит их взаимная компенсация при формировании обобщенного параметра P .

Для получения максимальной эффективности управления и минимизации возможных отклонений обобщенного параметра P следует определить наилучшие точки подключения межконтурной связи, ее структуру и оптимизировать параметры. Причем в зависимости от конкретных требований, предъявляемых к проектируемой многосвязной системе, оптимизация может проводиться по различным методам, к примеру методам Гаусса – Зейделя, Циглера – Николса и др.

Для выявления наилучших точек подключения межконтурной связи произведено сравнение динамических характеристик двух структур (рис. 3, рис. 4).

В качестве ПФ элементов системы будем использовать непрерывные ПФ регуляторов и объектов управления. В качестве объекта управления верхнего контура рассмотрим ПФ вида (1), нижнего контура ПФ вида (2):

$$W_{oy1}(p) = \frac{K_{oy1}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \cdot \frac{1}{T_{31}^2 p^2 + 2\xi T_{31} p + 1}; \quad (1)$$

$$W_{oy2}(p) = \frac{K_{oy2}}{T_4 p + 1} \cdot \frac{1}{T_{32}^2 p^2 + 2\xi T_{32} p + 1}; \quad (2)$$

$$W_p(p) = K_p + \frac{K_i}{p} + K_d p. \quad (3)$$

Параметры объекта определены экспериментально [2]:

$$K_{oy1} = 1,5; K_{oy2} = 1; T_{31} = 0,8с; T_{32} = 0,08с; \xi = 0,4; T_4 = 2с; T_1 = 2,24с; T_2 = 1,56с.$$

Для объектов, используемых в локальных контурах, рекомендовано применять ПИД-регуляторы вида (3). Оптимальные настройки регуляторов подобраны известным методом Гаусса – Зейделя по имитационной модели системы [5].

Оптимальные параметры регулятора верхнего контура: $k_p = 0,2; k_i = 0,1; k_d = 0,5$, нижнего контура: $k_p = 0,4; k_i = 0,12; k_d = 1,42$.

На рис. 1, 3, 5 введены следующие обозначения: x_1 и x_2 – задающие воздействия локальных САУ; W_{p1} и W_{p2} – передаточные функции регуляторов; W_{oy1} и

W_{oy2} – передаточные функции объектов управления; y_1 и y_2 – выходные координаты локальных САУ (частные параметры качества); P – обобщенный параметр.

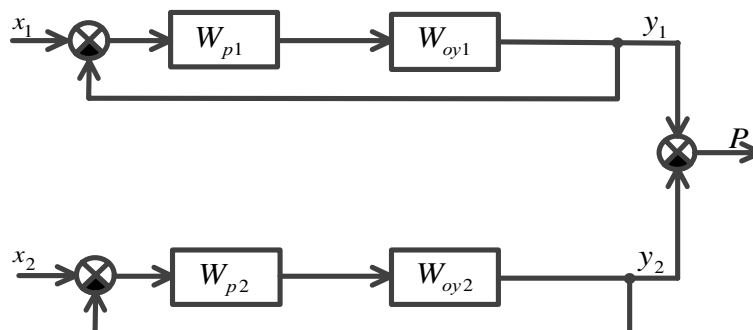


Рис. 1. Структурная схема многосвязного объекта

С использованием имитационной модели системы, реализованной в Simulink, построены динамические характеристики системы как по выходам частных параметров y_1 и y_2 , так и по выходу обобщенного параметра P . Для исследования динамических характеристик системы многосвязного управления на оба входа двухконтурной системы поданы единичные ступенчатые воздействия. В статике данным входным воздействием должно соответствовать нулевое значение обобщенного параметра P . На рис. 2 показаны графики возмущенных процессов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ и график результирующей временной зависимости обобщенного параметра P .

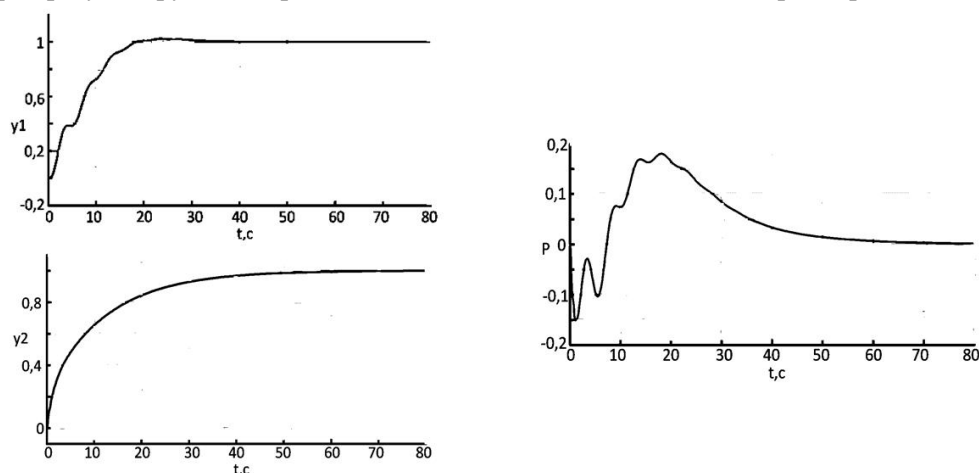


Рис. 2. Переходные процессы многосвязной системы

Рассмотрим перекрестное регулирование многосвязной системы. Принцип построения данной системы заключается в подаче воздействия отклонения верхнего контура в сумматор нижнего контура и подаче воздействия отклонения нижнего контура в сумматор верхнего контура [4].

В перекрестных связях использовали межконтурный пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (МКР ПИД) (см. рис. 3). Проведены исследования, получены переходные процессы по выходу y_1 , y_2 и P . На входы задающих воздействий многосвязной системы было подано единичное ступенчатое воздействие.

По результатам исследований выяснилось, что наилучшего результата при использовании специального блока Signal Constraint библиотеки Simulink можно достичь при отрицательном перекрестном регулировании. Для нахождения наилучших параметров блок использует алгоритм последовательного программирования и квази-ньютоновский метод градиентного поиска.

Данный вид регулирования заключается в следующем: воздействие отклонения (ВО) верхнего контура вычитается из задающего воздействия и воздействия обратной связи (ОС) нижнего контура и соответственно ВО нижнего контура вычитается из задающего воздействия и воздействия ОС верхнего контура (см. рис. 3) [4]. Для получения динамических характеристик системы использовалась имитационная модель, реализованная в Simulink [6].

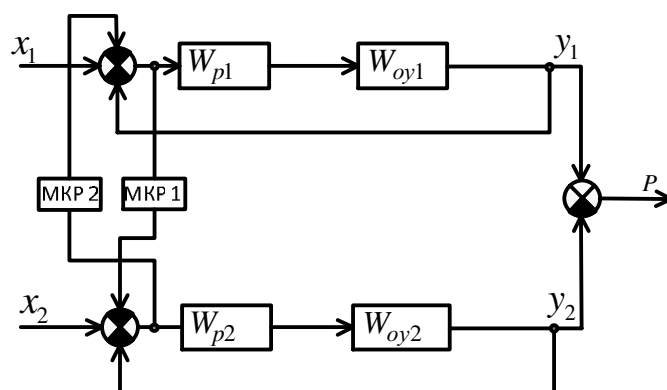


Рис. 3. Структурная схема перекрестного управления с МКР ПИД

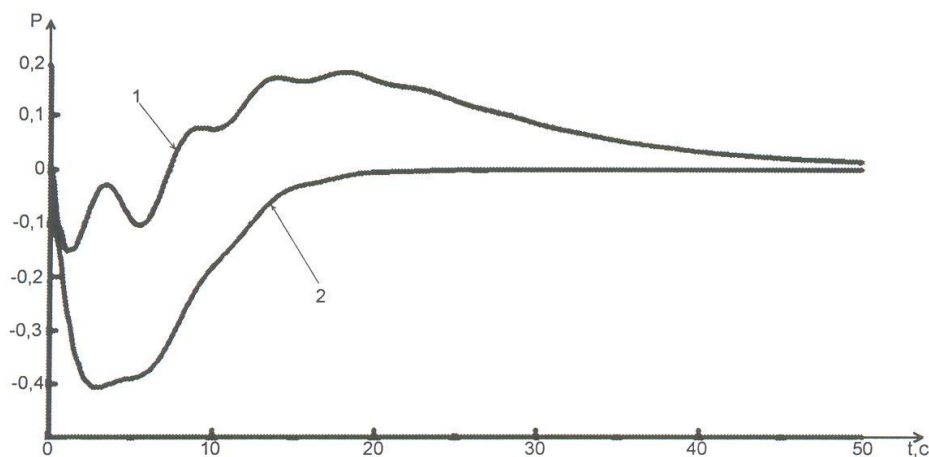


Рис. 4. Переходные процессы многосвязной системы по выходу обобщенного параметра P :
1 – без использования перекрестного управления; 2 – с использованием перекрестного управления

После проведения оптимизации параметров межконтурного регулятора с использованием блока Signal Constraint получены следующие оптимальные значения параметров регуляторов:

– МКР 1: $k_p = 1,12 \cdot 10^{-5}$; $k_i = 2,24 \cdot 10^{-5}$; $k_d = 5 \cdot 10^{-3}$;

– МКР 2: $k_p = 0,001$; $k_i = 3,36 \cdot 10^{-4}$; $k_d = 2,17 \cdot 10^{-5}$.

Сравним полученные динамические характеристики с динамическими характеристиками, полученными без использования перекрестного управления (рис. 4).

После сравнения динамических характеристик с перекрестным управлением и без него можно сказать, что данный метод оптимизации ПИД-регулятора, выполненный средствами Simulink, приводит к улучшению характеристик на выходах частных параметров y_1 , y_2 многосвязной системы, а также P .

Сравнивая динамические характеристики по выходу обобщенного параметра (рис. 4), можно сказать, что построение многосвязной системы по перекрестному типу привело к улучшению характеристик системы. Время переходного процесса уменьшилось приблизительно на 25–30 %.

Принцип построения многосвязной системы с перекрестным управлением, представленной на рис. 5, заключается в вычитании управляющей координаты (УК) верхнего контура из УК нижнего контура и наоборот УК нижнего контура из УК верхнего контура. В перекрестных связях использовался МКР ПИД. При использовании схемы, в которой УК верхнего контура суммируется с УК нижнего контура и УК нижнего контура суммируется с УК верхнего контура, переходные процессы как по выходам частных параметров, так и по выходу обобщенного параметра при оптимальных настройках получались неудовлетворительными и не решали поставленной задачи. Далее для оптимизации будем применять структурную схему, изображенную на рис. 5.

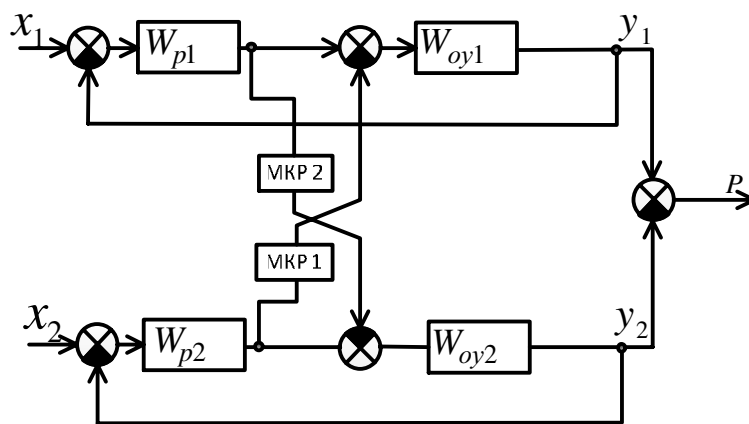


Рис. 5. Структурная схема комбинированного управления

После проведения оптимизации параметров межконтурных регуляторов с использованием блока Signal Constraint получены следующие оптимальные значения параметров регуляторов:

– МКР 1: $k_p = -3,13$; $k_i = -1,18 \cdot 10^{-3}$; $k_d = 5,21$;

– МКР 2: $k_p = 3,13$; $k_i = -3,3 \cdot 10^{-3}$; $k_d = 0,26$.

Сравним полученные динамические характеристики с динамическими характеристиками, полученными без использования перекрестного управления (рис. 6).

После сравнения динамических характеристик с перекрестным управлением и без него можно сказать, что данный метод оптимизации ПИД-регулятора, сделанный

средствами Simulink, приводит к улучшению характеристик на выходе y_1, y_2 и P .

С применением перекрестного управления второго вида по выходу обобщенного параметра время переходного процесса сократилось приблизительно на 30–35 % (рис. 6).

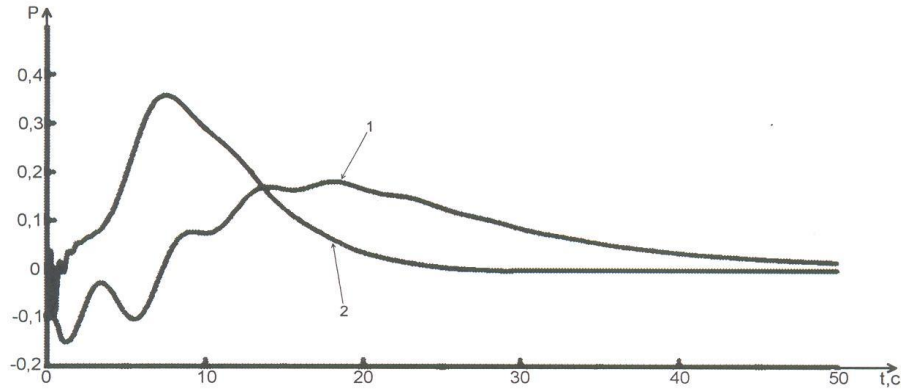


Рис. 6. Переходные процессы многосвязной системы по выходу обобщенного параметра P :
1 – без перекрестного управления; 2 – с перекрестным управлением

С учетом возможной многоэкстремальности поверхности значений критерия оптимальности в области возможных настроек регулятора окончательная оптимизация ПИД-регулятора произведена симплексным методом на примере односвязного объекта управления верхнего контура, что дало существенное улучшение характера возмущенного процесса, показанного на рис. 7.

Регулярным симплексом в пространстве R^n называется правильный многогранник, образованный $(n+1)$ -ми равноотстоящими друг от друга вершинами. Для случая $n=2$ это равносторонний треугольник, для случая $n=3$ – тетраэдр, где n – число оптимизируемых параметров [7, 8].

Если в пространстве R^n необходимо построить регулярный симплекс, одна из вершин которого находится в точке $X^0 = (x_1^0; x_2^0 \dots x_n^0)$, то координаты вершин такого симплекса удобно задавать с помощью $n \cdot (n+1)$ -матрицы:

$$R_{n \times (n+1)} = \begin{pmatrix} x_1^0 & x_1^0 + r_1 & x_1^0 + r_2 & \dots & x_1^0 + r_n \\ x_2^0 & x_2^0 + r_2 & x_2^0 + r_1 & \dots & x_2^0 + r_n \\ x_3^0 & x_3^0 + r_2 & x_3^0 + r_2 & \dots & x_3^0 + r_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_n^0 & x_n^0 + r_2 & x_n^0 + r_2 & \dots & x_n^0 + r_1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

В матрице $R_{n \times (n+1)}$ каждый i -й столбец представляет собой координаты i -й вершины симплекса, $i = \overline{1..(n+1)}$. Параметры r_1 и r_2 рассчитываются по формулам

$$r_1 = l \frac{\sqrt{n+1} + n - 1}{n\sqrt{2}}; \quad (5)$$

$$r_2 = l \frac{\sqrt{n+1} - 1}{n\sqrt{2}}, \quad (6)$$

где l – длина ребра симплекса.

В алгоритме симплекс-метода используется следующее важное свойство регулярного симплекса: если одну из вершин регулярного симплекса перенести на надлежащее расстояние вдоль прямой, соединяющей данную вершину и центр тяжести оставшихся вершин, то вновь получится регулярный симплекс.

Пусть $X_i^r, i = \overline{1..(n+1)}$ – векторы координат вершин регулярного симплекса. Тогда при выполнении операции отражения k -й вершины симплекса имеет место следующая связь координат этой вершины и новой вершины:

$$\frac{X_k^r + X_k^{r+1}}{2} = X_c^r. \quad (7)$$

Здесь $X_c^r = \frac{1}{n} \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^{n+1} X_i^r$ – вектор координат центра тяжести остальных вершин

симплекса (за исключением отраженной вершины k).

Таким образом, после отражения k -й вершины симплекса с координатами вершин $X_i^r, i = \overline{1..(n+1)}$ получаем новый симплекс с координатами вершин:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i^{r+1} = X_i^r, i = \overline{1..(n+1)}, \text{ при } i \neq k \\ X_k^{r+1} = 2X_c^r - X_k^r \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Описанным методом проведена оптимизация настроек регулятора верхнего контура по минимуму среднеквадратичного критерия (9). Непрерывный ПИД-регулятор можно представить ПФ в виде (3).

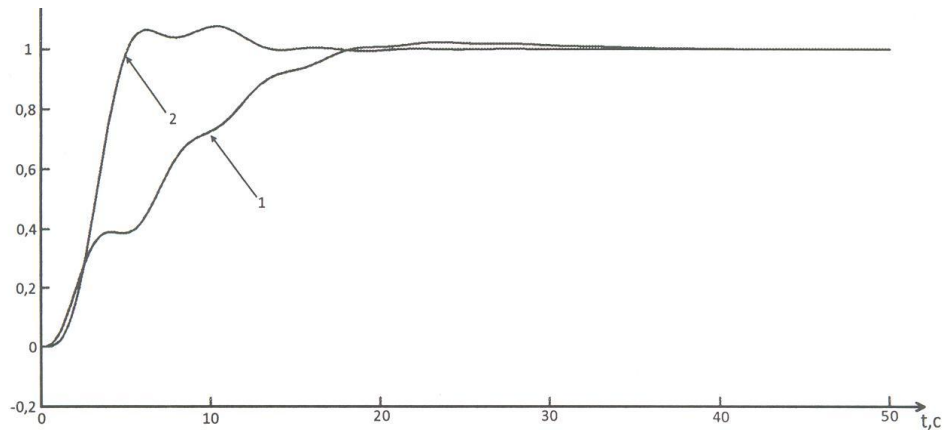


Рис. 7. Переходные процессы по выходу верхнего контура:

1 – метод настройки по имитационной модели; 2 – метод симплекс-оптимизации ПИД-регулятора

Перемещением симплекса по плоскости настроек регулятора до ситуации, когда симплекс перестает перемещаться, а начинает вращаться, определена точка, соответствующая оптимальности всей системы связанного управления:

$$J = \int e^2(t) dt \rightarrow \sum_{k=1}^N e^2(k) \rightarrow \min. \quad (9)$$

После проведения оптимизации ПИД-регулятора по вышеописанному методу с ОУ вида (1) получили, что значение критерия оптимальности при новых рассчитанных параметрах регулятора, заданных первой вершиной симплекса, стало наименьшим, равным 2,645. Аналогичным пересчетом настроек регулятора получены параметры регулятора $k_p = 0,555$, $k_i = 0,237$ и $k_d = 0,027$, соответствующие минимуму (9).

Как видно из рис. 7, при применении симплекс-метода оптимизации появилось перерегулирование, время переходного процесса сократилось приблизительно на 50 %. Тем самым динамические характеристики по выходу обобщенного параметра также улучшатся.

В заключение можно отметить, что выбранные в качестве показателей эффективности время переходного процесса и интегральная ошибка показали, что обе структуры практически эквивалентны и могут выбираться на основе сравнения простоты их реализации. Если данные структурные решения не в полной мере обеспечивают улучшение динамики системы, то рекомендуется применять симплексный метод оптимизации параметров регуляторов в многосвязной системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Денисов В.Ю., Чостковский Б.К. Двухконтурная система управления обобщенным параметром // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – Вып. 36.
2. Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи: Монография. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.: ил.
3. 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.
4. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука; Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 768 с.
5. Клюев А.С. Автоматическое регулирование. – М.: Энергия, 1967. – 344 с.
6. Образовательный математический сайт [Электронный ресурс]. Электрон. дан. – М.: 15.03.12. – Режим доступа <http://www.exponenta.ru>, свободный. Загл. с экрана – Яз. рус.
7. Хартман К. и др. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 447 с.
8. Кузин Л.Т. Основы кибернетики. – М.: Энергия, 1973. – 503 с.

Статья поступила в редакцию 1 июля 2013 г.

OPTIMIZATION OF MULTICONNECTION CONTROL BY MEANS OF THE SIMPLEX METHOD

B.K. Chostkovsky¹, V.U. Denisov², A.I. D'yakonov¹

¹ Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100

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

The use of various kinds of cross-regulation in multivariable generalized parameter control system, and the application of the simplex method for optimization of controller parameters are discussed.

Keywords: *multivariable system, cross-regulatory, intercontour controllers, generalized parameter, regular simplex.*

*Boris K. Chostkovsky (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Artem I. D'yakonov, Graduate student.
Vladimir U. Denisov, Engeneer.*