

УДК 681.5

**СТРАТЕГИЯ СИНТЕЗА И ОПТИМИЗАЦИИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ  
ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ<sup>1</sup>****Б.К. Чостковский, В.Н. Митрошин**Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Рассмотрена методика синтеза структуры многоконтурной системы автоматического управления технологическими процессами производства кабелей связи. Приведены результаты математического описания стохастического процесса формирования вероятностных характеристик входного коэффициента отражения кабеля, выбранного в качестве его обобщенной эксплуатационной характеристики. Обоснован выбор наиболее универсального цифрового регулятора и процедура его эмпирической оптимизации. Предложен МНК-регулятор, обеспечивающий реализацию произвольной желаемой формы возмущенного процесса управляемой системы. Обоснован критерий оптимизации, связывающий параметры регулятора с эксплуатационной характеристикой кабеля.*

**Ключевые слова:** *нерегулярные кабели связи, случайная функция, коэффициент отражения, спектральная плотность, цифровой регулятор, оптимизация.*

Промышленность производит электрические кабели связи, коаксиальные и симметричные с парной и четверочной скруткой. Кабель является длинномерным изделием, которое изготавливается «на проход» путем совмещения определенного числа одновременно выполняемых технологических операций с помощью устройств и систем, последовательно расположенных по ходу движения кабельного изделия.

Благодаря применению в составе технологического оборудования локальных систем автоматической стабилизации (САС) технологических режимных параметров, конструктивных и электрических характеристик изготавливаемого кабельного изделия реальные кабели можно рассматривать как слабо нерегулярные линии, для которых получены решения обобщенных телеграфных уравнений, связывающих эксплуатационные характеристики кабелей с динамическими характеристиками систем автоматической стабилизации первичных и вторичных параметров [1]. Для электрических кабелей связи основные эксплуатационные показатели качества определяются их частотными характеристиками.

Соответственно, качество САС может оцениваться вкладом ее ошибки стабилизации в уровень нерегулярности изготавливаемого кабеля, обуславливающим величины измеряемого модуля входного коэффициента отражения  $\Gamma(f)$  в заданном диапазоне частот  $f_1 \div f_2$ . Причем функция  $\Gamma(f)$  является случайной функцией, значения которой подчиняются закону Релея [1]:

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 15-08-04209-а).  
Борис Константинович Чостковский (д.т.н., доц.), профессор кафедры «Автоматика и управление в технических системах».  
Владимир Николаевич Митрошин (д.т.н., доц.), зав. кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».

$$F(\Gamma) = P[\Gamma_p < \Gamma] = P_\Gamma = 1 - \exp\left(-\frac{4-\pi}{4} \cdot \frac{\Gamma^2}{\sigma_\Gamma^2}\right), \quad (1)$$

где дисперсия модуля входного коэффициента отражения  $\sigma_\Gamma^2$  определяется величиной спектральной плотности функции волнового сопротивления кабеля  $Z$  по его длине  $x$  на пространственной частоте  $g_0$  при фазовой скорости  $v$ :

$$g_0 = \frac{2f}{v}, \quad (2)$$

$$\sigma_\Gamma^2 = \frac{(4-\pi)\pi^2}{16Z_0^2} \cdot \frac{g_0^2}{\alpha(f)} \cdot S_Z(g_0), \quad (3)$$

где  $Z_0$  – номинальное значение волнового сопротивления кабеля;

$S_Z(g_0)$  – величина двухсторонней спектральной плотности функции  $Z(x)$  на пространственной частоте  $g_0$ , связанной с частотой  $f$  передаваемого по кабелю сигнала выражением (2).

Математическое ожидание модуля входного коэффициента отражения в соответствии с (1) и (3) также определяется величиной спектральной плотности волнового сопротивления на пространственной частоте  $g_0$ :

$$m_\Gamma = \sqrt{\pi/(4-\pi)} \sigma_\Gamma. \quad (4)$$

В свою очередь, благодаря малости отклонения стабилизируемых параметров кабеля  $\Pi_i(x)$  и адекватности линеаризованной зависимости волнового сопротивления  $Z$  от них спектральная плотность  $S_Z(g)$  может быть выражена через спектральные плотности параметров кабеля, формируемых в ходе их автоматической стабилизации соответствующими локальными САС:

$$S_Z(g) = \sum_{i=1}^n K_i^2 S_i(g) + \sum_{i,j=1;i \neq j}^n K_i K_j L_{ij}(g), \quad (5)$$

где  $K_i$  – чувствительность волнового сопротивления к  $i$ -ому параметру;

$S_i(g)$  – спектральная плотность  $i$ -того параметра, рассматриваемая в дальнейшем как спектральная плотность динамической ошибки  $i$ -той локальной САС;

$L_{ij}(g)$  – синфазные компоненты взаимных спектральных плотностей динамических ошибок  $i$ -той и  $j$ -той САС, которые могут изменяться введением межконтурных регуляторов в комплекс САС.

Для построения временной имитационной модели формирования стабилизируемых параметров кабеля, учитывая, что длина кабеля  $x$  пропорциональна скорости движения кабельного изделия  $V_T$ , следует от пространственной частоты  $g$  перейти к временной угловой частоте  $\omega$ :

$$\omega = \frac{4\pi V_T f}{v}. \quad (6)$$

Приведенные выражения (1) ÷ (6) позволяют сформировать критерии качества всех САС, обеспечивающих технологический процесс производства кабелей связи.

При рассмотрении величины модуля входного коэффициента отражения, обусловленной динамическими ошибками соответствующей локальной САС, как «функции потерь», качество управления в среднем оценивается математическим ожиданием функции потерь (функции веса), то есть «средним риском».

Отсюда следует, что за критерий оптимальности локальных САС АСУТП производства кабелей связи можно принять критерий минимума среднего риска, определяемый выражением (4) с учетом выражений (3) и (5) [2].

Минимизация данного критерия приведет к оценке оптимальных значений настроек цифровых регуляторов комплекса всех САС, для чего необходимо представить все спектральные плотности  $S_i(g)$  как функции угловой частоты  $S_i(\omega)$ , которые, в свою очередь, следует выразить через амплитудно-частотные характеристики САС, содержащие в своих аналитических выражениях настройки цифровых регуляторов с дискретными передаточными функциями вида

$$G_p(z) = \frac{Q(z)}{P(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_v z^{-v}}{1 - z^{-1}}. \quad (7)$$

Учитывая трудоемкость корреляционно-спектрального анализа, можно рекомендовать выразить спектральные плотности ошибок регулирования через их дисперсии и интервалы корреляции, которые автоматически оцениваются известными аппаратными средствами [3].

Тогда, например, при типовой корреляционной функции диаметра изоляции экспоненциального вида вклад вариаций диаметра в математическое ожидание измеряемого коэффициента стоячей волны напряжения  $\left( \text{КСВН} = \frac{1+\Gamma}{1-\Gamma} \right)$  для коаксиального кабеля зоной связи может оцениваться следующим образом:

$$m_{\text{ГД}} = 1 + c(D)^{\frac{1}{2}} (\tau_k)^{\frac{1}{4}}, \quad (8)$$

где  $c = 2,3 \cdot 10^3, \left[ \text{м}^{\frac{3}{4}} \right]$ ;  $D$  – дисперсия диаметра;  $\tau_k$  – интервал корреляции диаметра.

В результате весь комплекс цифровых систем управления (ЦСУ) совмещенными технологическими операциями должен рассматриваться как система, то есть функциональная совокупность элементов. Совокупность отдельных технологических операций как элементов данной системы и связи между элементами определяют взаимозависимость введенных обобщенных показателей качества управления и обобщенных параметров нерегулярности кабеля.

Совокупность связей предыдущих и последующих технологических операций определяет структуру системы, автоматическое управление которой реализуется введением цифровых регуляторов (ЦР) в прямые, обратные и межконтурные связи.

Проведенные исследования позволили определить рекомендации по выбору структуры и типа цифровых регуляторов всего комплекса САС, которые делятся на две группы: 1) параметрически оптимизируемые регуляторы, структуры которых выбираются из известных соображений, например обеспечения астатизма системы; 2) структурно оптимизируемые регуляторы, у которых структура и параметры определяются автоматически в процедуре синтеза по известным дис-

кретным передаточным функциям объекта управления и формирующего фильтра его возмущающего воздействия [4].

Исследования показали, что наиболее эффективным является использование параметрически оптимизируемого линейного обобщенного цифрового регулятора с передаточной функцией:

$$G_p(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{Q(z)}{P(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_\nu z^{-\nu}}{p_0 + p_1 z^{-1} + \dots + p_\mu z^{-\mu}}. \quad (9)$$

Причем в большинстве случаев может быть использован полином простейшего вида  $P(z) = 1 - z^{-1}$ , который обеспечивает астатизм системы и при соответствующем подборе параметров полинома  $Q(z)$  эквивалентен непрерывному пропорционально-интегрально-дифференциальному регулятору (ПИД):

$$G_p(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}. \quad (10)$$

Передаточной функции (10) соответствует рекуррентный алгоритм управления

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2), \quad (11)$$

где  $e(k)$  – ошибка регулирования;

$u(k)$  – управление.

Данный регулятор наиболее удобен для реализации локальных САС, и его параметры оптимизируются по любому критерию оптимальности перемещением регулярного симплекса в пространстве настроек регулятора  $q_0, q_1, q_2$  [5].

При оптимизации на имитационной модели управляемого технологического процесса путем оптимальной настройки с минимизацией  $m_T$  в рабочем диапазоне частот кабеля достигается его наивысшая регулярность, и поэтому ЦР (10) рекомендуется в качестве основного регулятора для локальных САС. Из структурно-оптимизируемых ЦР рекомендуется модификация аperiodического регулятора, дискретная передаточная функция которого добавляется равными, но не сокращаемыми виртуальными нулями и полюсами [6]. Выбираемые величины данных нулей и полюсов обеспечивают желаемый вид кривой возмущенного процесса локальной ЦСУ, в частности линейный, обеспечивающий нерегулярность кабеля вида «плавный переход» и приводящий к минимальным отражениям передаваемого по кабелю сигнала.

При дискретной модели объекта управления вида

$$G_o(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (12)$$

передаточная функция терминального регулятора имеет вид

$$G_p(z) = \frac{q_0 A(z) \prod_{i=1}^m (1 - z_i z^{-1})}{1 - q_0 B(z) \prod_{i=1}^m (1 - z_i z^{-1})}. \quad (13)$$

Замкнутая ЦСУ с данным регулятором описывается передаточной функцией

$$G(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = q_0 B(z) \cdot \prod_{i=1}^m (1 - z_i z^{-1}), \quad (14)$$

где  $q_0 = \frac{1}{\sum_{i=1}^n b_i}$ .

Переходный процесс в данной системе заканчивается за  $(n + m)$  тактов, а его форма определяется выбираемыми величинами виртуальных полюсов  $z_i$  [6].

Заключительным этапом синтеза управления являются имитационное моделирование управляемого технологического процесса с введенными ЦР и их эмпирическая оптимальная настройка симплексным методом, обеспечивающая достижение наилучших эксплуатационных характеристик выпускаемой кабельной продукции, используемых в качестве ее обобщенных показателей качества [7].

В соответствии с разработанной стохастической моделью формирования обобщенных показателей качества кабеля связи предлагается следующая иерархическая модель вводимых в АСУТП цифровых регуляторов (ЦР).

1. ЦР нижнего уровня, на которых реализуются системы автоматической стабилизации (САС) технологических режимных параметров (температур, скоростей электроприводов и др.).

2. ЦР среднего уровня, на которых реализуются САС первичных параметров кабеля (диаметра изоляции, ее диэлектрической проницаемости и др.).

3. ЦР вторичных параметров кабеля, использующих их косвенные оценки.

4. ЦР косвенно оцениваемых эксплуатационных характеристик кабеля (частотной характеристики КСВН коаксиального кабеля, переходного затухания симметричного кабеля и др.).

Так, при автоматизации производств радиочастотных кабелей, в том числе кабеля для передачи данных (LAN-кабелей), обобщенной эксплуатационной характеристикой может быть выбрана оценка среднего уровня затухания передаваемого по кабелю сигнала в заданном диапазоне частот до  $f_B$ . В соответствии с описанной зависимостью затухания от уровня нерегулярности кабеля [4] модель обобщенного эксплуатационного параметра может быть записана в виде

$$A_{cp} = \frac{1}{f_B} \cdot \int_0^{f_B} f^2 \sum_{i=1}^n \left[ K_i^2 S_{Pi} \left( \frac{2f}{v} \right) + \sum_{i=j=1; i \neq j}^n K_i K_j L_{ij} \left( \frac{2f}{v} \right) \right] df, \quad (15)$$

где  $K_i$  – чувствительность обобщенного эксплуатационного параметра кабеля к  $i$ -ому  $i$ -ому управляемому параметру;

$S_{Pi} \left( \frac{2f}{v} \right)$  – величина спектральной плотности  $i$ -того управляемого параметра кабеля, которая может рассматриваться как спектральная плотность ошибки регулирования локальной САС данного параметра, определяемой оптимизируемыми настройками  $i$ -того цифрового регулятора;

$\frac{2f}{v}$  – значение пространственной частоты нерегулярности, взаимодействующей с гармоникой передаваемого сигнала с частотой  $f$  ;

$v$  – скорость распространения сигнала по кабелю;

$L_{ij}\left(\frac{2f}{v}\right)$  – синфазная составляющая взаимной спектральной плотности

$i$ -того и  $j$ -того управляемых параметров, которая может формироваться вводимым межконтурным регулятором  $i$ -той и  $j$ -той САС.

С учетом того, что оптимизация параметров вводимых цифровых регуляторов должна осуществляться методом эмпирической настройки на имитационной модели управляемого технологического процесса [1], спектральные плотности ошибок регулирования всех локальных САС должны быть выражены через квадраты их амплитудно-частотных характеристик, содержащих значения оптимизируемых настроек ЦР [4]. Так будет сформулировано пространство настроек комплекса локальных САС, перемещение в котором регулярного симплекса определяет точку оптимальных настроек [5].

Построена методика синтеза цифрового регулятора, позволяющего реализовать ЦСУ, форма возмущенного процесса в которой максимально приближается к желаемому виду, например линейному. Согласно данной методике задается порядок проектируемого цифрового регулятора и согласно методу наименьших квадратов (МНК) строится система нормальных уравнений, содержащая известные параметры дискретной модели объекта управления и оптимизируемые параметры цифрового регулятора. Решение данной системы и определяет МНК-регулятор. Задание прямоугольной формы возмущенного процесса приводит к синтезу ЦСУ максимального быстрого действия [8].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чостковский Б.К. Математическая модель формирования обобщенных параметров качества нерегулярных кабелей связи в стохастической постановке // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2006. – Вып. 42. – С. 147–161.
2. Пугачёв В.С., Казаков И.Е., Евланов Л.Г. Основы статистической теории автоматических систем. – М.: Машиностроение, 1974. – 400 с.
3. Прикладной анализ случайных процессов / Под ред. С.А. Прохорова. – Самара: СНЦ РАН, 2007. – 582 с. – ISBN 978-5-93424-283-2.
4. Чостковский Б.К. Моделирование и алгоритмизация процессов управления в стохастических системах с цифровыми регуляторами: учеб. пособие. – Самара: СамГТУ, 2013. – 145 с.
5. Чостковский Б.К., Денисов В.Ю., Дьяконов А.И. Оптимизация многосвязного регулирования симплексным методом // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 59–66.
6. Чостковский Б.К. Алгоритмизация терминального управления совмещенным технологическим процессом изготовления радиочастотных кабелей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2002. – Вып. 14. – С. 33–37.
7. Чостковский Б.К., Денисов В.Ю. Двухконтурная система управления обобщенным параметром // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 4(36). – С. 90–97.
8. Чостковский Б.К., Ландфанг М.А. Цифровые системы управления: лабораторный практикум. – Самара: СамГТУ, 2015. – 134 с.

Статья поступила в редакцию 14 сентября 2017 г.

# STRATEGY OF SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS OF TECHNOLOGICAL PROCESSES OF COMMUNICATION CABLES PRODUCTION

***B.K. Chostkovskiy, V.N. Mitroshin***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

*Method of synthesis of structure of multi-loop automatic control systems of technological processes of communication cables production was considered. Results of a mathematical description of the stochastic process of formation of the probabilistic characteristics of the input reflectivity of a cable chosen as its generalized operational characteristic are presented. The selection of the most universal digital controller and the procedure for its empirical optimization are substantiated. A least squares regulator is proposed to ensure the implementation of an arbitrary desired form of the disturbed process of the controlled system. The optimization criterion connecting the regulator parameters with the operational characteristic of the cable is substantiated.*

***Keywords:*** *non-regular communication cables, random function, reflection coefficient, spectral density, digital controller, optimization.*