

УДК 681.5:621.315

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЕМОГО ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ИЗОЛЯЦИИ ЖИЛ КАБЕЛЕЙ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Б.К. Чостковский, М.А. Строилова, Ю.В. Митрошин

Самарский государственный технический университет
Россия, 443110, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Разработана методика оптимизации технологического процесса экструзии, которая реализуется с использованием корреляционно-спектрального анализа характеристик кабеля с параметризацией его результатов. Для реализации аналитической оптимизации и имитационного моделирования систем управления технологическими процессами экструзии произведена параметризация бесконечномерных оценок корреляционно-спектрального анализа. Используются два метода параметризации: аппроксимация оценок типовыми выражениями и расщепление спектральной плотности с получением передаточных функций формирующих фильтров.

Ключевые слова: *экструзия, производство кабелей связи, LAN-кабель, математическая модель, параметризация моделей, критерий оптимальности, спектральная плотность, корреляционная функция, корреляционно-спектральный анализ, формирующий фильтр.*

Все большую долю современных линий связи составляют электропроводные кабели для передачи данных (LAN-кабели). Они относятся к классу радиочастотных симметричных двухжильных кабелей, основу которых составляет так называемая витая пара из двух скрученных изолированных жил. Ее характеристики в основном и определяют первичные параметры передачи и параметры влияния между кабельными цепями (емкостные связи и магнитные или индуктивные связи). Распределение первичных параметров по длине кабеля определяет вторичные параметры передачи и влияния (погонное и переходное затухания, возвратные потери) [2]. Вторичные параметры определяют важнейшую эксплуатационную характеристику кабеля – скорость передачи данных, которая может достигать более 2,5 Гбит/с.

Важнейшей областью применения LAN-кабелей являются высокоскоростные структурированные кабельные сети для компьютерных сетей, содержащие вертикальные и горизонтальные проводки, для которых чаще всего используются четырехпарные неэкранированные кабели категории 5 – так называемые UTP-кабели. Однако новые структурированные компьютерные системы уже требуют кабелей более высоких категорий. Важное место в процессе формирования параметров передачи и влияния занимает технологический процесс экструзии изоляции и характеристики обслуживающих его локальных систем стабилизации.

Современное экструзионное оборудование кабельных производств, выполняющее наложение диэлектрического покрытия кабельной жилы, обеспечивает автоматизированный сбор статистических данных технологических режимных

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

Марина Александровна Строилова, магистрант.

Юрий Владимирович Митрошин, аспирант.

параметров и первичных параметров изолированной жилы, прежде всего погонной емкости $C_i(t)$ и диаметра изоляции $D_i(t)$. Статистическая обработка данных позволяет получать оценки их корреляционных функций и спектральных плотностей, которые являются непараметрическими бесконечномерными моделями соответствующих случайных функций, непригодными для имитационного моделирования [1].

Погонная емкость изоляции является измеряемым параметром экструдированной пористой изоляции, но она лишь косвенным образом связана с эксплуатационными характеристиками изготавливаемой витой пары.

В линеаризованном виде технологический процесс формирования параметров жилы представлен структурной схемой (рис. 1), где $\varepsilon(t)$ – диэлектрическая проницаемость изоляции, K_D и K_ε – чувствительности погонной емкости изолируемой жилы к ее диаметру и относительной диэлектрической проницаемости.

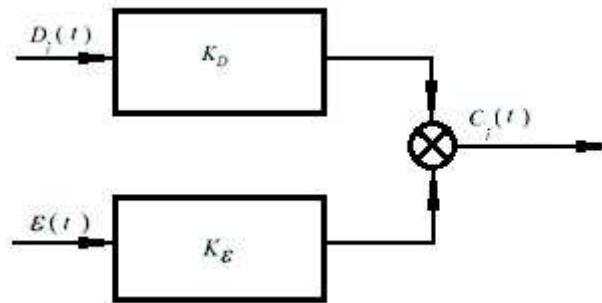


Рис. 1. Формирование параметров жилы

Определяющее значение в формировании рабочей емкости и, соответственно, первичных и вторичных параметров кабелей передачи данных имеет эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость среды между проводниками витой пары ε_e . Обычно при комбинированной изоляции она рассматривается как средневзвешенное значение проницаемости диэлектрических компонент сечения пары. Весовые коэффициенты при этом берутся равными долям площади сечения, занимаемым каждой из компонентов [2].

Точность данной оценки невелика, так как она не учитывает неравномерность электромагнитного поля в сечении витой пары. Поэтому для определения рабочей емкости было применено конформное преобразование на основе дробно-линейной функции и без использования принятых аппроксимаций получена следующая зависимость эквивалентной диэлектрической проницаемости от геометрических и электрических параметров жил витой пары [3]:

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon [L_1 + L_2 + L_3]}{\varepsilon_2 \varepsilon \cdot L_1 + \varepsilon_1 \varepsilon \cdot L_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 \cdot L_3}, \quad (1)$$

где $L_1 = D_{i2}(D_{i1} - d)(D_{i2} + d)$;

$L_2 = D_{i1}(D_{i2} - d)(D_{i1} + d)$;

$L_3 = (D_{i1} + D_{i2})(D_{i1} + d)(D_{i2} + d)$;

ε_1 и ε_2 – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции первой и второй жил пары, которые оцениваются в процессе экструзии по измеряемым

«на проход» величинам погонной емкости [2];

D_{i1} и D_{i2} – диаметры изоляции жил;

d – диаметр медного проводника жил;

ε – относительная диэлектрическая проницаемость среды между изолированными жилами пары, равная единице при отсутствии дополнительных диэлектрических компонент.

Оптимизация управления требует, во-первых, обоснованного критерия оптимальности, и во-вторых, адекватных математических моделей оптимизируемых технологических процессов.

Для дальнейшего использования этих оценок в задачах аналитического описания, оптимизации технологических процессов и сертификации кабельной продукции необходим переход к параметрическим моделям, которые в дальнейшем будут рассматриваться и как математические модели возмущающих воздействий соответствующих контуров автоматической стабилизации первичных параметров кабельного изделия, например жил витой пары кабеля передачи данных [2, 4].

Параметризация оценок корреляционно-спектральных характеристик обычно производится следующими способами [1, 4]:

– аппроксимация оценки корреляционной функции или спектральной плотности одним из типовых аппроксимирующих выражений, например экспоненциально затухающей корреляционной функцией;

– аппроксимативный корреляционно-спектральный анализ экспериментальных данных в ортогональных базисах, чаще всего в базисе функции Лагерра;

– построение передаточной функции модели в виде формирующего фильтра путем факторизации спектральной плотности или интерполяции амплитудно-частотной характеристики формирующего цифрового фильтра по важнейшим точкам оценки спектральной плотности [4].

Обобщенный стохастический показатель качества $Q(f)$ кабеля с двухпарной скруткой, определяющий эксплуатационные характеристики кабеля для передачи данных, строится по выражению (2), в котором роль функции изменения обобщенного параметра качества $q'(x)$, изменяющейся по длине кабеля x , играет коэффициент электромагнитной связи $N_{12}(x)$ [2]:

$$Q(f) = \int_0^l q'(x) e^{-2\gamma x} dx. \quad (2)$$

При этом обобщенный показатель $Q(f)$ представляет собой частотную передаточную функцию влияния на ближнем конце $K_o(f)$, определяющую переходное затухание на ближнем конце $A_o(f)$:

$$K_o(f) = \int_0^l N_{12}(x) e^{-2\gamma x} dx, \quad (3)$$

где γ – коэффициент распространения;

l – длина кабеля;

f – частота передаваемого сигнала.

При небольшом коэффициенте затухания α коэффициент распространения линейно зависит от частоты:

$$\gamma = \alpha + j\beta \approx j\beta = j \frac{2\pi f}{v},$$

где v – фазовая скорость электромагнитной волны.

При передаче сигналов с верхней частотой f_g среднее значение показателя (3)

$$\overline{K_o}(f) = \frac{1}{f_g} \cdot \int_0^{f_g} K_o(f) df. \quad (4)$$

Тогда взаимное влияние на ближнем конце линии определяется средним значением переходного затухания:

$$\overline{A_o}(f) = \ln \frac{2}{|\overline{K_o}(f)|}.$$

Математическая модель симметричного кабеля в стохастической постановке определяется спектральной плотностью волнового сопротивления $S_z(\frac{2f}{v})$, аргумент которой соответствует пространственной частоте гармоники волнового сопротивления, взаимодействующей с частотой f проходящего по кабелю сигнала. Спектральная плотность волнового сопротивления, в свою очередь, выражается через спектральные плотности параметров изолированных жил, формируемых как спектральные плотности динамических ошибок соответствующих контуров автоматической стабилизации с возмущаемыми воздействиями, имеющими характер стационарных случайных процессов. Так, математическое ожидание приращения затухания кабеля $\Delta\alpha l$ за счет случайной нерегулярности со спектральной плотностью $S_z(\frac{2f}{v})$ определяется выражением [2]

$$\Delta\alpha l = K_o(f) \frac{1 - e^{-4\alpha l}}{\alpha} \cdot f^2 S_z(\frac{2f}{v}), \quad (5)$$

где вид частотно-зависимого коэффициента $K_o(f)$ определяется конкретными особенностями кабеля и уточняется эмпирически.

В работе исследуются реализации диаметра изоляции и погонной емкости. Данные случайные процессы экспериментально сняты при изолировании провода ТПппП-0,5-0,84 на линии ТЕМ-35 № 1 Самарской кабельной компании. Диаметр изоляции изменялся в диапазоне от 0,85 до 0,95 мм, погонная емкость менялась в диапазоне от 171,66 до 216,47 пФ/м. Реализации погонной емкости (рис. 2) и диаметра изоляции (рис. 3) приведены в нормированном виде после центрирования. Нормирующие множители взяты равными $1,065 \text{ пФ}^{-1} \cdot \text{м}$ для погонной емкости и $962,9 \text{ мм}^{-1}$ для диаметра изоляции.

Далее построена стохастическая модель объекта управления по исходным данным, полученным путем статистического обследования с регистрацией реализаций.

По виду оценок корреляционных функций (1 на рис. 4, 5) выбрана колебательная модель корреляционной функции [1]:

$$R_X(\tau) = \sigma_x^2 \cdot e^{-\alpha|\tau|} \cos\omega_0\tau, \quad (6)$$

где σ_x^2 – дисперсия случайного процесса;

α – коэффициент затухания;
 ω_0 – угловая частота.

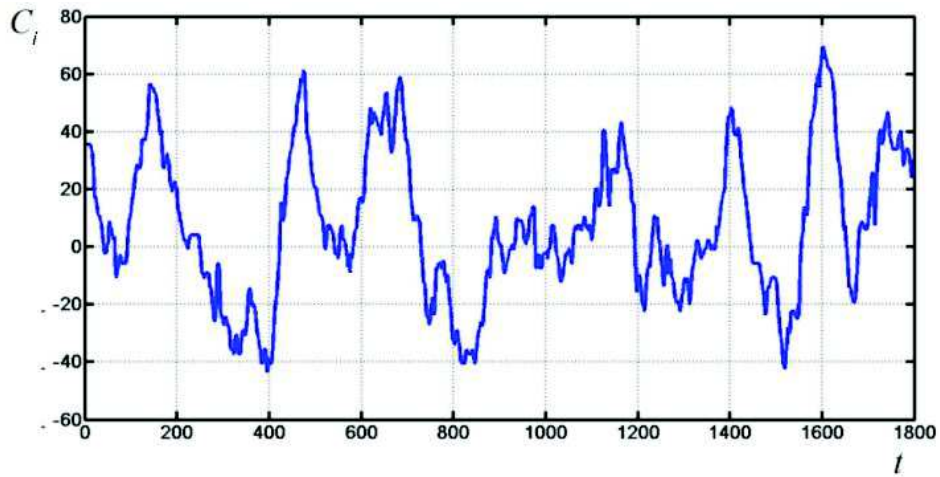


Рис. 2. Экспериментально снятая реализация погонной емкости $C_i(t)$

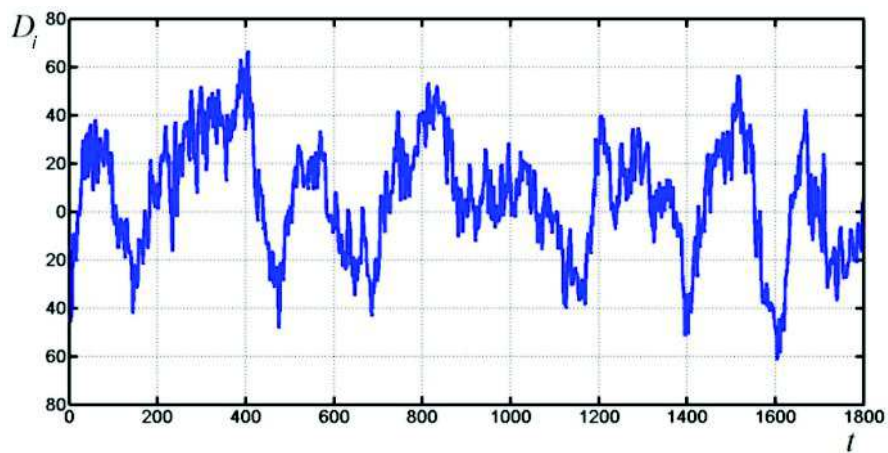


Рис. 3. Экспериментально снятая реализация диаметра изоляции $D_i(t)$

В результате аппроксимации получены аналитические модели нормированных корреляционных функций погонной емкости

$$R_C(\tau) = 640 \cdot e^{-0,012|\tau|} \cos 0,025\tau \quad (7)$$

и диаметра изоляции

$$R_D(\tau) = 558 \cdot e^{-0,013|\tau|} \cos 0,030\tau. \quad (8)$$

Адекватность аналитических моделей является удовлетворительной (2 на рис. 4, 5), что означает приемлемость их дальнейшего использования для синтеза имитационной модели технологического процесса экструзии с целью оптимальной настройки регуляторов систем стабилизации.

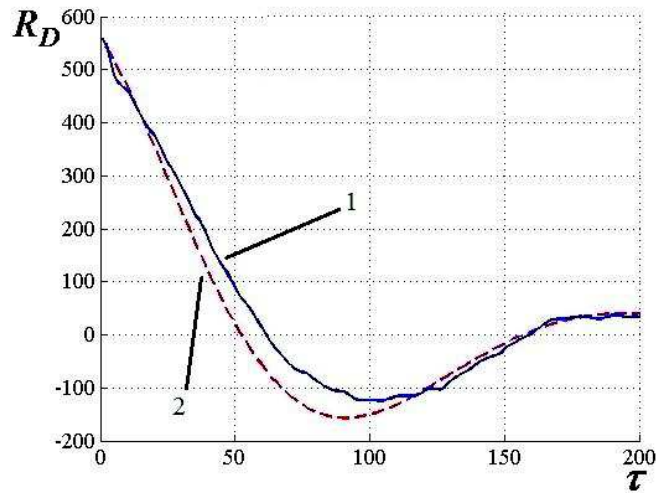


Рис. 4. Проверка адекватности аналитической модели КФ погонной емкости:
1 – экспериментальная оценка; 2 – аналитическая модель

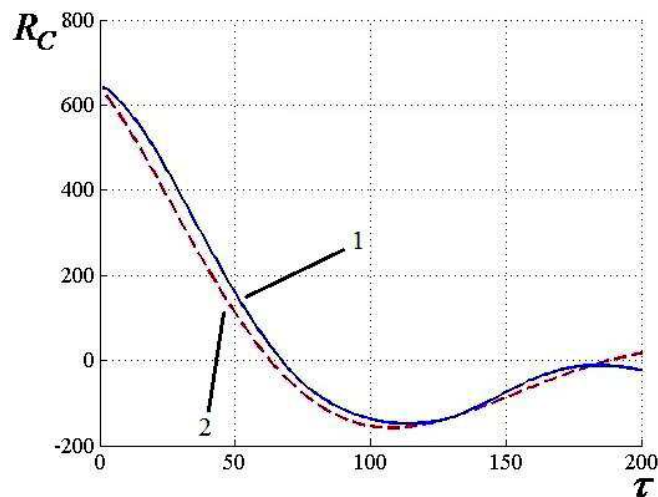


Рис. 5. Проверка адекватности аналитической модели КФ диаметра изоляции:
1 – экспериментальная оценка; 2 – аналитическая модель

По известной корреляционной функции $R_X(\tau)$ определяется спектральная плотность возмущающего воздействия $S_X(\omega)$ [1, 4]. Спектральная плотность данного процесса описывается выражением

$$S_X(\omega) = 2\alpha\sigma_X^2 \frac{b^2 + \omega^2}{b^4 + 2(\alpha^2 - \omega_0^2)\omega^2 + \omega^4}, \quad (9)$$

где $\omega_0 = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = 0,035 \text{ c}^{-1}$ при периоде 180 с;

$$b = \sqrt{\omega_0^2 + \alpha^2} = 0,038 \text{ c}^{-1}.$$

Параметрические модели спектральных плотностей параметров кабельной жилы были получены в виде:

$$S_C(\omega) = \frac{5,819\omega^2 + 0,005}{\omega^4 - 0,002\omega^2 + 6,872 \cdot 10^{-7}};$$

$$S_D(\omega) = \frac{9,241\omega^2 + 0,012}{\omega^4 - 0,001\omega^2 + 1,315 \cdot 10^{-6}}.$$
(10)

Исходя из анализа рис. 6 и 7 можно сделать вывод, что найденные модели адекватны ввиду идентичности экспериментальным оценкам спектральных плотностей.

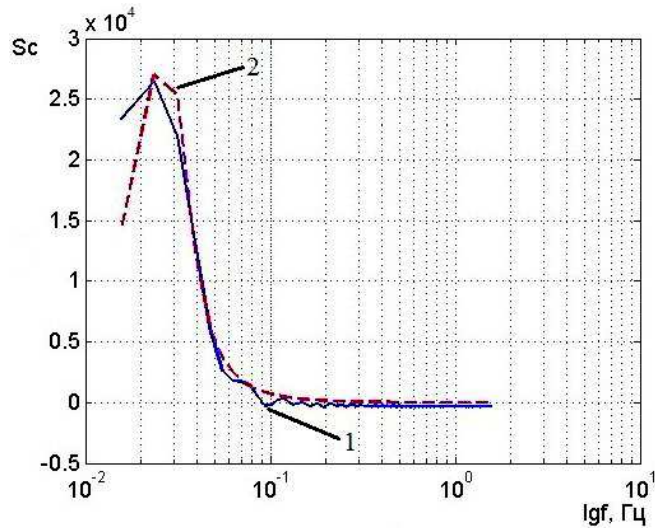


Рис. 6. Проверка адекватности аналитической модели спектральной плотности погонной емкости:
1 – экспериментальная оценка; 2 – аналитическая модель

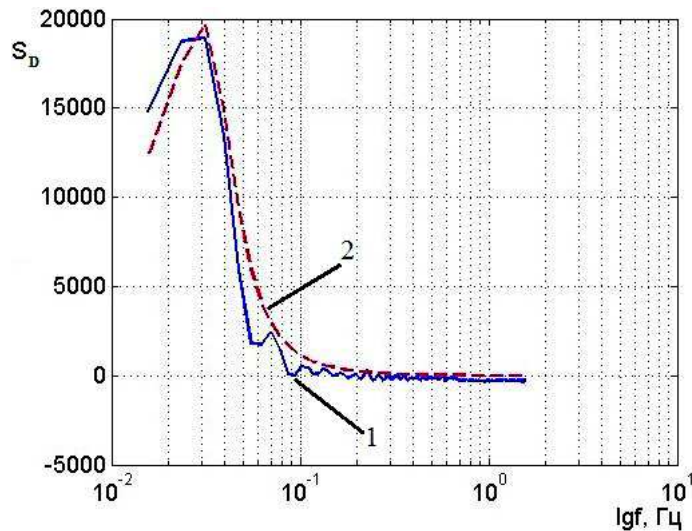


Рис. 7. Проверка адекватности аналитической модели спектральной плотности диаметра изоляции:
1 – экспериментальная оценка; 2 – аналитическая модель

Непрерывная передаточная функция параметрической модели процесса в виде формирующего фильтра имеет вид

$$W_{FF}(p) = \sigma_x \sqrt{2\alpha} \frac{b+p}{b^2 + 2\alpha p + p^2}. \quad (11)$$

Исходя из (11) определены непрерывные передаточные функции формирующих фильтров погонной емкости

$$W_{FFC}(p) = \frac{2,412p + 0,069}{p^2 + 0,020p + 0,829 \cdot 10^{-3}} \quad (12)$$

и диаметра изоляции

$$W_{FFD}(p) = \frac{3,040p + 0,010}{p^2 + 0,031p + 1,147 \cdot 10^{-4}}. \quad (13)$$

Для моделирования в дискретной форме и настройки цифровых регуляторов передаточные функции формирующих фильтров могут быть переведены в эквивалентные дискретные передаточные функции с помощью известных подстановок [5], например:

$$p = \frac{2}{T_o} \cdot \frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}},$$

где T_o – выбранный интервал квантования по времени.

Если же при построении модели случайного возмущающего воздействия приоритетной является адекватность в частотной области, то следует рассматривать спектральную плотность возмущающего воздействия как квадрат амплитудно-частотной характеристики цифрового формирующего фильтра. Задавшись порядком цифрового фильтра, можно записать аналитическое выражение его АЧХ, параметры которого определяются из условия прохождения кривой АЧХ через выбранные точки оценки спектральной плотности возмущающего воздействия [4].

Данным методом построена дискретная передаточная функция формирующего фильтра диаметра изоляции:

$$G_{FFD}(z) = \frac{1 + 0,5z^{-1} - 0,97z^{-2}}{1 - 1,3z^{-1} + 0,52z^{-2}}.$$

Объект управления каждого контура стабилизации экструзионной линии описан как апериодическое звено первого порядка с транспортным запаздыванием. Передаточная функция объекта выглядит как

$$W_o(p) = \frac{K_o}{Tp+1} \cdot e^{-\tau p}. \quad (14)$$

На технологической установке, осуществляющей наложение изоляции на жилу провода ТПппП-0,5-0,84, расстояние от головки экструдера до центра датчика погонной емкости 22,96 м, а расстояние от головки экструдера до датчика диаметра 19,31 м. Соответственно, при скорости изолирования 25 м/с запаздывание в контурах составляет

$$\tau_C = \frac{L_i}{V_T} = \frac{22,96}{25} \approx 0,9, c;$$

$$\tau_D = \frac{L_i}{V_T} = \frac{19,31}{25} \approx 0,8, c.$$

Для удобства сравнения параметры нормированы умножением на указанные

выше нормирующие множители.

Нормированные параметры объекта управления контура погонной емкости:

$$K_o = 1; T = 2 \text{ с}; \tau = 0,9 \text{ с}. \quad (15)$$

Нормированные параметры объекта управления контура диаметра изоляции:

$$K_o = 2; T = 1,5 \text{ с}; \tau = 0,8 \text{ с}. \quad (16)$$

При сравнении (15) и (16) видно, что контур погонной емкости обладает несколько большей инерционностью, чем контур диаметра изоляции.

ПИ-регуляторы введены в каждый из контуров управления и обеспечивают возможность изменения динамических свойств системы [4].

Передаточная функция регулятора имеет вид

$$W_p(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} \right), \quad (17)$$

где T_u – постоянная времени интегрирования;

K_p – коэффициент передачи регулятора (параметр П-составляющей).

Рассчитаны начальные настройки регулятора, которые удовлетворяют условию устойчивости системы. Для этого используются формулы Гурецкого (18)–(19), предназначенные для систем с запаздыванием [6]:

$$K_p = \frac{K}{K_o}, \quad (18)$$

где

$$K = 2T \cdot \left(\sqrt{2 + \left(\frac{1}{2T} \right)^2} - 1 \right) \cdot \exp \left(\sqrt{2 + \left(\frac{1}{2T} \right)^2} - \left(2 + \frac{I}{2T} \right) \right), \quad (19)$$

где T – время запаздывания;

$$T_u = I \cdot \tau, \quad (20)$$

где

$$I = \frac{1 + \left(\frac{1}{2T} \right)^2}{3 + \frac{1}{2T} + 4 \left(\frac{1}{2T} \right)^2 + \left(\frac{1}{2T} \right)^3 - \left[2 + \left(\frac{1}{2T} \right)^2 \right] \sqrt{2 + \left(\frac{1}{2T} \right)^2}}. \quad (21)$$

Для контура погонной емкости со структурой, показанной на рис. 6, получены начальные настройки регулятора:

$$K_p = 0,680; T_u = 1,882 \text{ с}. \quad (22)$$

Переходный процесс контура погонной емкости с настройками регулятора (22) приведен на рис. 8. На рис. 9 и 10 приведены графики изменения ошибки и производной ошибки.

Критерий *минимума дисперсии ошибки* (23) является одним из типовых критериев оптимальности. Данный критерий используется для ограничения дисперсии случайного возмущенного воздействия и обеспечения требуемой точности по задающему воздействию:

$$J = \int e^2(t) dt \rightarrow \sum_{k=1}^N e^2(k) \rightarrow \min. \quad (23)$$

В процессе выполнения программы оптимизации были получены настройки:

$$K_p = 1,012; \quad T_u = 1,697 \text{ с.} \quad (24)$$

Для сравнения применен критерий *минимума дисперсии производной ошибки* (25), который адекватен требованию изготовления кабеля с наилучшими эксплуатационными характеристиками, формирующимися соответственно производным по длине геометрических и электрических параметров кабеля, как это показано в [2]:

$$J = \int \dot{e}^2(t) dt \rightarrow \sum_{k=1}^N (e(k) - e(k-1))^2 \rightarrow \min. \quad (25)$$

В процессе выполнения программы оптимизации получены настройки:

$$K_p = 0,918; \quad T_u = 1,788 \text{ с.} \quad (26)$$

По результатам моделирования значение дисперсии производной ошибки значительно уменьшилось при использовании оптимальных настроек.

На рис. 8 изображены переходные процессы локальной САУ погонной емкости с настройками регулятора (22), (24) и (26). Анализ рисунка показывает, что настройки регулятора (22) обеспечивают форму переходного процесса, близкую к апериодической. С настройками регулятора (24) значение критерия оптимальности лучше, чем с настройками (22); время переходного процесса меньше, но перерегулирование увеличивается. Настройки (26) обеспечивают наилучшее значение критерия по дисперсии производной ошибки. С ними время переходного процесса меньше, чем с настройками (22), но больше, чем с настройками (24), однако перерегулирование меньше, чем с настройками (24).

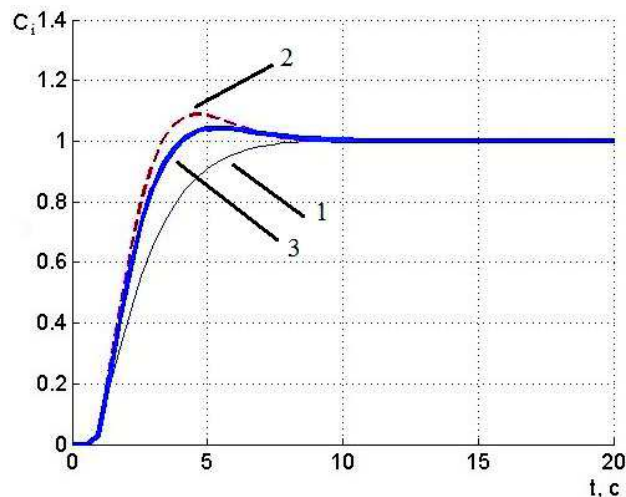


Рис. 8. Сравнение переходных процессов контура погонной емкости:
 1 – начальные настройки регулятора;
 2 – настройки по критерию минимума дисперсии ошибки;
 3 – настройки по критерию минимума дисперсии производной ошибки

Для окончательного выбора оптимальных настроек рекомендуется учитывать их влияние на частотные характеристики взаимных влияний организованных линий связи. Наилучшим путем здесь является выпуск опытных партий кабеля при различных настройках регулятора и сравнительный анализ достигнутых частотных характеристик, измеряемых в ходе приемо-сдаточных испытаний.

На рис. 9 и 10 показана динамика ошибки и производной ошибки в трех вышеперечисленных случаях настроек регулятора.

Оптимальными являются настройки (26), полученные по критерию минимума дисперсии производной ошибки. Выбор данного критерия оптимальности также обусловлен физикой формирования частотных характеристик кабеля [2]. В соответствии с уравнениями Максвелла, описывающими передачу сигнала по электрической цепи, вторичные параметры линии передачи определяются производными по длине кабеля его первичных параметров [2], что обуславливает предпочтительность настроек (26).

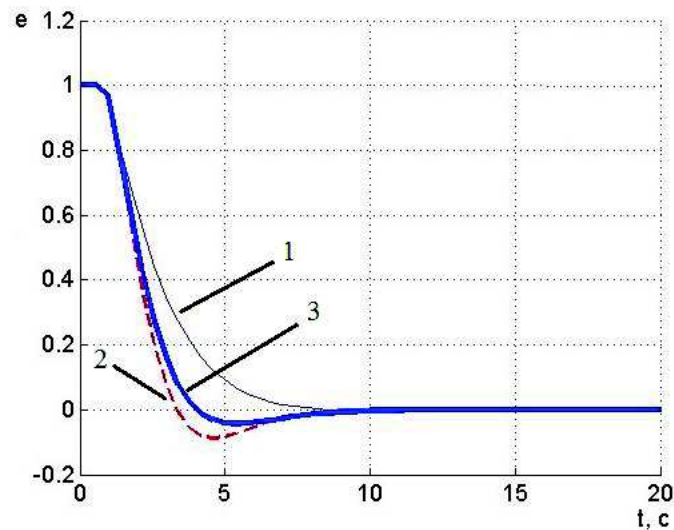


Рис. 9. Сравнение графиков изменения ошибки:
 1 – начальные настройки регулятора;
 2 – настройки по критерию минимума дисперсии ошибки;
 3 – настройки по критерию минимума дисперсии производной ошибки

Последним этапом проектирования стохастической управляемой системы является оптимизация параметров цифрового регулятора с учетом реальных оценок параметров модели объекта и возмущающего воздействия. Аналитическая оптимизация возможна только при невысоком порядке модели [4, 5]. Наибольшая эффективность управления достигается при оптимальной эмпирической настройке параметров регулятора системы на ее имитационной модели, адекватность которой и достигается использованием построенных в данной работе параметрических моделей.

Для глобальной оптимизации комплекса систем автоматического управления АСУ ТП производства кабелей передачи данных необходимо провести обследование технологических процессов изготовления кабеля с регистрацией первичных параметров изолированной жилы, рассматриваемых как реализации стационарных случайных процессов, по которым рассчитываются оценки корреляцион-

но-спектральных характеристик, необходимые для оптимальной настройки цифровых регуляторов всех контуров комплекса на их имитационных моделях.

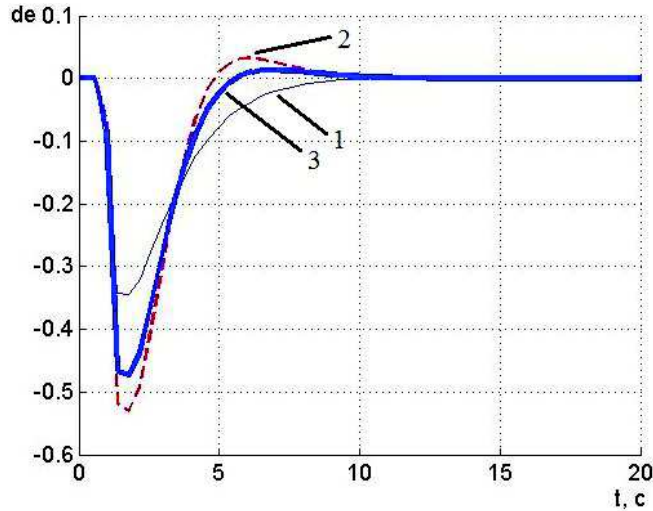


Рис. 10. Сравнение графиков изменения производной ошибки:
 1 – начальные настройки регулятора;
 2 – настройки по критерию минимума дисперсии ошибки;
 3 – настройки по критерию минимума дисперсии производной ошибки

На рис. 4 и 5 показаны результаты корреляционно-спектрального анализа, которые позволили определить оптимальные настройки регулятора (26).

Описанный подход, методика и процедуры построения параметрических моделей стохастических процессов формирования первичных и вторичных параметров кабелей обеспечивают возможность решения задач оптимизации параметров цифровых регуляторов локальных систем стабилизации по нестандартным критериям оптимальности, учитывающим эксплуатационные характеристики выпускаемой кабельной продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прикладной анализ случайных процессов / Под ред. С.А. Прохорова. – М.: СНИЦ РАН, 2007. – 582 с. – ISBN 978-5-93424-283-2.
2. Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи: Моногр. – М.: Машиностроение, 2009. – 189 с. – ISBN 978-5-94275-475-4.
3. Чостковский Б.К., Смородинов Д.А. Математическая модель витой пары радиочастотного кабеля объекта управления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физ.-мат. науки. – 2008. – № 1 (16). – С. 113-118. – ISSN 1991-8615.
4. Чостковский Б.К. Синтез и оптимизация управляемых стохастических систем: Учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 136 с.
5. Чостковский Б.К., Ландфанг М.А. Цифровые системы управления: лабораторный практикум. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 134 с.
6. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 328 с.

Статья поступила в редакцию 1 февраля 2016 г.

PARAMETRIC MODELING AND OPTIMIZATION OF DATA CABLE CORE INSULATION EXTRUSION CONTROL PROCESS

B.K. Chostkovskiy, M.A. Stroilova, Y.V. Mitroshin

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

Extrusion technological process optimization method, which is implemented by correlation and spectral analysis of cable characteristics with parameterization of its results, is developed. Parameterization of infinite-dimensional evaluations of correlation and spectral analysis for analytical optimization realization and imitation modeling of extrusion technological processes control systems is performed. Two methods of approximation are used: approximation of evaluations by typical expressions and spectral density splitting with obtaining of shaping filters transfer functions.

Keywords: *extrusion, communication cables production, LAN-cable, mathematical model, model parametrization, optimum criterion, spectral density, correlation function, correlation and spectral analysis, shaping filter.*

*Boris K. Chostkovskiy (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Marina A. Stroilova, Graduate Student.
Yury V. Mitroshin, Postgraduate Student.*