

УДК 681.5:621.315

## ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ СИСТЕМ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОЧАСТОТНЫХ КАБЕЛЕЙ

© Б. К. Чостковский, Д. А. Рагазин

*Самарский государственный технический университет,  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244  
E-mail: dragazin@yandex.ru*

Разработанная ранее методология построения автоматизированных систем управления технологическими процессами производства коаксиальных кабелей связи распространяется на решение задач синтеза цифровых управляемых систем автоматизации технологических процессов изготовления радиочастотных кабелей, в том числе передачи данных, на которых строятся структурированные кабельные системы проводки для реализации локальных компьютерных систем. Описана методология нового подхода к оптимизации управления многоуровневых систем «снизу вверх», реализуемых на внутриконтурных и межконтурных цифровых регуляторах, обеспечивающих глобальную оптимизацию по обобщённым показателям качества управления, которые в отличие от типовых критериев оптимизации позволяют достигать наилучших эксплуатационных характеристик выпускаемой кабельной продукции, что обеспечивается оптимальной настройкой цифровых регуляторов по имитационной модели управляемой системы.

*Ключевые слова:* стохастическая система, случайные процессы, параметрическая оптимизация, структурная оптимизация, цифровые регуляторы, терминальное управление, апериодический регулятор, производство радиочастотных кабелей.

DOI: 10.15372/AUT20230209

**Введение.** Современный этап развития информационной техники требует создания новых видов аппаратуры связи и радиочастотного оборудования. Их эффективное использование невозможно без высококачественных защищённых каналов связи, реализуемых по радиочастотным линиям передачи, важнейшей частью которых являются радиочастотные кабели (РЧК), работающие в диапазоне метровых и дециметровых волн, в том числе электропроводные кабели для передачи данных посредством структурированных кабельных систем проводки (LAN-кабели (Local Area Network), т. е. кабели для локальной сети) [1–4].

Производство РЧК реализуется путём совмещения большого числа технологических операций в связанный технологический процесс (ТП) при сочленении различных узлов технологического оборудования в единую цифровую управляемую систему, формирующую «на проход» кабельные изделия с заданными эксплуатационными характеристиками (затуханием, коэффициентом распространения, волновым сопротивлением, коэффициентом стоячей волны напряжения (КСВН), рабочей ёмкостью), которые определяют категорию кабеля, область его применения и цену.

В целом рассматриваемая управляемая система состоит из комплекса локальных систем автоматической стабилизации технологических режимных параметров (температур, давления, скоростей), датчиков и исполнительных устройств, которые располагаются на единой линии совмещённых ТП вдоль движущегося изготавливаемого «на проход» кабельного изделия.

Кроме штатных систем автоматической стабилизации режимных параметров, оборудование дооснащается дополнительными датчиками и контурами управления для достижения мониторинга и управляемости всего комплекса локальных цифровых систем (ЦС)

автоматического управления, реализуемых на цифровых регуляторах (ЦР) различного порядка чаще всего на основе астатического обобщённого линейного алгоритма управления с дискретной передаточной функцией (ДПФ) следующего вида [4–9]:

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

где  $z$  — переменная  $Z$ -преобразования;  $U(z)$ ,  $E(z)$  — управляющее воздействие и воздействие отклонения ЦС в форме  $Z$ -преобразования;  $Q(z)$ ,  $P(z)$  — полиномы, формирующие закон управления ЦС;  $q_i$  — параметры ЦР, настройка которых определяет статические и динамические характеристики соответствующей ЦС, а также определяет процесс минимизации выбранного критерия оптимальности, в частности, реализацию наилучших эксплуатационных показателей и параметров качества выпускаемой кабельной продукции [4].

Дискретной передаточной функции (1) соответствует алгоритм, связывающий управляющее воздействие  $u(k)$  с поступающей на вход ЦР ошибкой управления (воздействием отклонения)  $e(k)$ :

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + \dots + q_v e(k-v). \quad (2)$$

Оптимальные настройки  $q_i$  определяются эмпирически путём перемещения регулярного симплекса в пространстве настроек по результатам одного опыта на каждом шаге [4, 7, 10, 11] с оценкой значения выбранного критерия оптимальности и зеркальным отображением вершины симплекса с наихудшим значением выбранного критерия оптимальности, например эксплуатационного параметра РЧК (затухания или др.).

Цель данной работы — формирование стратегии и тактики построения и глобальной оптимизации по эксплуатационным критериям качества управления связанного комплекса локальных цифровых подсистем многоуровневой автоматизированной системы автоматического управления и контроля технологических процессов производства радиочастотных кабелей (ТПП РЧК) высокой регулярности, в том числе кабелей для передачи данных (LAN-кабелей), реализующих структурированные системы проводки.

Построение системы управления данного комплекса локальных систем автоматического управления (ЛСАУ) предполагает синтез его структуры, выбор цифровых регуляторов как внутриконтурных, так и межконтурных, параметрическую оптимизацию параметров ЦР на адекватной имитационной модели, в том числе по выбранным обобщённым эксплуатационным показателям качества, а также структурную оптимизацию ЦС на основе использования известной дискретной модели объекта управления в форме его дискретной передаточной функции  $G_0(z)$  для построения ДПФ ЦР [4, 5, 6, 7, 8].

Важнейшим ТП кабельного производства является процесс экструзии полимерной изоляции, в том числе пористой и фторопластовой изоляции [1, 3, 5, 9, 10]. Выполнено аналитическое описание и структурное моделирование процессов в зоне дозирования одночервячного экструдера и охлаждения кабельной жилы в водяных ваннах экструзионных линий. Построенные математические модели позволили реализовать автоматическое оптимальное управление ТП экструзии вспениваемой изоляции, что необходимо при производстве кабелей передачи данных (LAN-кабелей 6-й категории) и обеспечивает переход к более высокой категории кабелей на том же технологическом оборудовании [5, 6, 7, 11].

**Математическая модель нерегулярного кабеля.** Известно, что ТПП РЧК имеют стохастический характер [4, 12]. Соответственно при выборе структуры и оптимизации параметров цифровых регуляторов ЛСАУ ТП возможны два подхода.

При первом подходе учитывается только то обстоятельство, что все контуры ЛСАУ содержат звенья транспортного запаздывания. Время запаздывания  $\tau$  определяется временем прохождения кабельного изделия от места формирования (например, головки экструдера) до места расположения датчика стабилизируемого  $i$ -го параметра (например,

датчика диаметра экструдированной изоляции) и при вариациях скорости тяги  $v_T(t)$ , которая является переменной [4].

Учитывая, что транспортное запаздывание  $\tau$  существенно превышает суммарную постоянную времени всех исполнительных органов управления, оказалось возможным аналитически определить закон управления, адаптивный к переменной скорости  $v_T$ , и построить робастный ЦР путём его синхронизации (тактирования) не сигналом таймера, а тактовым сигналом мерного колеса датчика длины [4, 6–8]. Инерционная часть объекта управления оценивается методом активной идентификации [5].

Второй подход (частотно-временной) обусловлен тем, что в высокочастотных нерегулярных кабелях проявляется эффект интерференции гармоник передаваемых по РЧК электромагнитных сигналов с соответствующими отражениями от гармоник остаточной нерегулярности кабеля, определяемой случайными динамическими ошибками комплекса систем автоматической стабилизации, что приводит к большому затуханию резонирующих гармоник передаваемых сигналов [2, 3, 4, 13].

Поэтому глобальная оптимизация управления с учётом эксплуатационных параметров РЧК требует построения не только детерминированной, но и стохастической модели формирования нерегулярности РЧК, удобной для аналитической аппроксимации и эмпирического использования с применением пакета прикладных программ, в том числе при разработке новых технических условий и государственных стандартов.

Для слабонерегулярной кабельной линии телеграфные уравнения, описывающие распространение волн вдоль линии, могут быть сведены к уравнению Риккати относительно входного коэффициента отражения в произвольном сечении кабеля с координатой  $x$ . Решение этого уравнения имеет вид известной частотной зависимости [2, 3, 4]:

$$\Gamma_{\text{вх}}(f) = \frac{1}{2z_0} \int_0^l z'(x) e^{-2\gamma x} dx, \quad (3)$$

где  $l$  — длина кабеля;  $\gamma = \alpha + j\beta$  — коэффициент распространения;  $\alpha$  — коэффициент затухания;  $\beta$  — коэффициент фазы;  $z_0$  — номинальное значение волнового сопротивления кабеля;  $z'(x)$  — величина производной по длине кабеля  $x$  его функции волнового сопротивления (ФВС)  $Z(x)$ ;  $f$  — частота передаваемого сигнала (несущей).

Детерминированная модель РЧК может быть описана как частотная зависимость модуля входного коэффициента отражения, определённая периодограммой (амплитудным спектром Фурье) ФВС [4, 8, 9]:

$$\Gamma_f = \frac{\pi g}{4z_0} \sqrt{\frac{2(1 - e^{-4\alpha l})}{\alpha}} \sqrt{\Pi_Z(g)}, \quad (4)$$

где  $g = 1/L$  — пространственная частота (волновое число);  $L$  — период гармоник нерегулярности по длине кабеля ФВС  $Z(x)$ ;  $\Pi_Z(g)$  — амплитуда пика периодограммы на пространственной частоте  $g$ ;  $\Gamma_f$  — величина модуля входного коэффициента отражения  $\Gamma_{\text{вх}}$  на частоте  $f$  передаваемого сигнала (несущей).

Следует отметить, что детерминированная модель (4) полезна лишь при исследовании конкретного образца кабеля, так как волновое сопротивление  $z$  формируется рядом первичных параметров кабеля  $p_i(x)$  (диаметром внутреннего проводника  $d(x)$ , диаметром изоляции  $D_u(x)$ , диэлектрической проницаемостью изоляции  $\varepsilon_u(x)$ ), которые могут быть описаны как случайные функции, формируемые как воздействие отклонения  $e(x)$  соответствующих систем автоматической стабилизации [4].

Данное обстоятельство требует стохастического подхода к синтезу и оптимизации управления всеми ТПП РЧК, построения имитационной модели проектируемой АСУ ТП

и её использования для эмпирической настройки всего комплекса ЦР по выбранному обобщённому критерию оптимизации.

Основная характеристика нерегулярности, измеряемая в ходе приёмосдаточных испытаний и определяющая категорию кабеля, — частотная зависимость КСВН ( $f$ ) (частотная рефлектограмма), представляющая собой множество пиков, амплитуды которых обусловлены резонирующими гармониками ФВС  $Z(x)$  и могут рассматриваться как случайные величины [3, 9, 10, 14]:

$$\text{КСВН}(f) = \frac{1 + \Gamma(f)}{1 - \Gamma(f)}, \quad (5)$$

где  $\Gamma(f) = |\Gamma_{\text{вх}}(f)|$ .

Учитывая, что выражение (5) хорошо аппроксимируется ввиду малости  $\Gamma(f)$ , введём переменную  $K_f$ :

$$\text{КСВН}(f) - 1 \approx 2\Gamma(f) = 2\Gamma = K_f. \quad (6)$$

Соответствующее несмещённое значение КСВН  $K_f$  может рассматриваться как случайная величина, подчиняющаяся распределению закона Рэлея [1, 2, 3, 4, 14].

Рассматривая амплитуды пиков частотных характеристик КСВН как случайные величины, их дисперсию с учётом (6) можно выразить через известную дисперсию модуля входного коэффициента отражения  $D_r$  [4, 15]:

$$D_k = D[K_f] = 4D_r = 4\sigma_r^2 = \frac{(4 - \pi)\pi^2 g^2}{4z_0^2 \alpha} S_Z(g), \quad (7)$$

где дисперсия модуля входного коэффициента отражения  $\sigma_r^2$  может быть выражена через спектральную плотность мощности  $S_Z(g)$  ФВС  $Z(x)$ , которая рассматривается далее как стационарная случайная функция с нормальным законом распределения и формируется как взвешенная сумма воздействий отклонения (ошибок управления) всего комплекса ЛСАУ [4, 8, 14, 16].

При этом случайная величина  $K_f$  подчиняется закону распределения Рэлея [3, 4, 11, 14], что позволяет найти следующие числовые характеристики.

1. Функция распределения случайной величины  $k_f$ :

$$F(k_f) = P(K_f < k_f) = 1 - \exp\left(-\frac{k_f^2}{4D_k/(4 - \pi)}\right) = 1 - \exp\left(-\frac{(4 - \pi)k_f^2}{4D_k}\right), \quad (8)$$

где  $D_k$  — дисперсия  $K_f$ ;  $\sigma$  — параметр распределения Рэлея.

2. Математическое ожидание случайной величины  $K_f$ :

$$m_k = M[(K_f)] = \sigma\sqrt{\pi/2}.$$

3. Дисперсия  $K_f$ :

$$D_k = M[(K_f - m_k)^2] = 2\sigma^2 - \frac{\pi\sigma^2}{2} = \frac{4 - \pi}{2} \sigma^2.$$

Из выражения (8) легко определяется «выход годного РЧК», т. е. вероятность превышения величиной  $K_f$  заданного значения  $K_0$ :

$$P(K_f < K_0) = F(K_0).$$

И, наоборот, задавшись «выходом годного», из (8) можно определить максимально допустимое значение дисперсии КСВН  $D_{k \max}$  и с учётом (7) верхнюю границу допустимых значений спектральной плотности мощности  $S_z(g)$ .

Далее, зная дисперсию  $D_k$ , из (7) можно определить допустимое значение дисперсии модуля входного коэффициента отражения  $\sigma_\Gamma^2$ , которая, как известно, для РЧК определяется спектральной плотностью ФВС [4] и формирует дисперсию модуля КСВН на пространственной частоте  $g$  [4, 12, 17]:

$$D_k = 4\sigma_\Gamma^2 = \frac{4 - \pi}{32z_0^2} \frac{1 - \exp(-4\alpha l)}{\alpha} S_{Z'}(g),$$

где  $z_0$  — номинальное значение волнового сопротивления;  $\alpha$  — коэффициент затухания;  $l$  — длина РЧК;  $S_{Z'}(g)$  — односторонняя ( $g \in (0, +\infty)$ ) спектральная плотность мощности (СПМ) производной ФВС  $Z(x)$ ;

$$g = 2f/v \quad (9)$$

— пространственная частота гармоники нерегулярности (волновое число), резонирующей с гармоникой передаваемого по РЧК электромагнитного сигнала с частотой  $f$ .

Функция волнового сопротивления  $Z(x)$ , входящая в зависимость (3), выражается через ёмкость  $C$  и индуктивность  $L$  проводной линии, в том числе РЧК [3, 12, 14], что позволяет для линеаризованной модели выразить спектральную плотность ФВС через СПМ параметров РЧК  $p_i(x)$ :

$$Z(x) = \sqrt{L(x)/C(x)}. \quad (10)$$

Выразив диэлектрическую проницаемость среды между проводниками кабеля  $E_u(x)$  через его первичные параметры, например, для кабеля коаксиальной конструкции, в котором диаметр изоляции  $D_{uz} \leq D$ , получим ФВС [4]

$$\begin{aligned} Z(x) &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \sqrt{\ln \frac{D(x)}{d(x)} \left( \ln \frac{D(x)}{d(x)} + \frac{1}{E_u(x)} \ln \frac{D(x)}{d(x)} \right)} \approx \\ &\approx Z_0 + \sum_i^n k_i \Delta z_i(x) = Z_0 + \sum_i^n k_i p_i(x), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\mu_0$  — абсолютная магнитная проницаемость вакуума;  $\varepsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;  $k_i$  — чувствительность ФВС к  $i$ -му параметру РЧК, оцениваемая как величина производной от ФВС (11) по  $i$ -му параметру коаксиального РЧК.

Выражение (11) позволяет обозначить вероятностные параметры ФВС  $Z(x)$  через характеристики параметров кабеля  $p_i(x)$ , в частности, спектральная плотность мощности  $S_Z(g)$  ФВС  $Z(x)$  складывается как взвешенная сумма спектральных плотностей мощности стабилизируемых параметров, формирующихся как воздействия отклонения соответствующих ЛСАУ и зависящих от настроек цифровых регуляторов данных систем и синфазных компонент взаимных спектральных плотностей параметров, требуемый вид которых может быть сформирован конкретным видом амплитудно-частотных характеристик вводимых межконтурных регуляторов [4, 10, 12, 18, 19, 20, 25, 26]:

$$S_z(g) = \sum_i^n k_i^2 S_{p_i}(g) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1, i < j}^n k_i k_j L_{ij}(g), \quad (12)$$

где  $S_{p_i}(g)$  — СПМ  $p_i(x)$ ;  $L_{ij}(g)$  — синфазная составляющая взаимной СПМ  $p_i(x)$  и  $p_j(x)$ , которая может быть сформирована введением межконтурного ЦР  $i$ -й и  $j$ -й ЦС [4, 19].

Необходимые эмпирические оценки СПМ возмущающих воздействий оцениваются коррелограммным методом при их сглаживании методом «стягивания корреляционного окна» [4, 21, 26]:

$$S_x(f) = \int_{-M}^M k(\tau) R_x \cos(2\pi f\tau) d\tau, \quad (13)$$

где  $M$  — ширина прямоугольного корреляционного окна (или окна Тьюки  $k(\tau)$ ) [4, 26].

Частотно-временной характер подхода к синтезу цифрового управления ТП производства РЧК определяется тем, что их эксплуатационные параметры и показатели обуславливаются не только частотными характеристиками РЧК, но и импульсными характеристиками кабеля, когда он используется для передачи импульсных сигналов в радиоэлектронной аппаратуре или, например, когда импульсная характеристика должна иметь форму «плавного перехода» [3, 8, 14, 15].

Подобная математическая модель и разработанная на её основе средствами пакета MatLab адекватная имитационная модель (имитирующая не только динамические характеристики объекта, но и стохастические воздействия окружающей среды в виде формирующих фильтров, передаточные функции которых определялись расщеплением спектральных плотностей возмущающих воздействий) были построены и для кабеля передачи данных, основой которого является витая пара, а вторичным параметром, определяющим регулярность кабельной линии, — её рабочая ёмкость  $C(x)$ . Методом конформных преобразований создана модель, отражающая зависимость обобщённого параметра  $C(x)$  от управляемых параметров, формируемых как динамические ошибки двухконтурной ЛСАУ [11, 15, 16, 21, 22]. Модель позволила оптимизировать ЦР процесса экструзии пористой изоляции витой пары. Данные модели дают возможность дополнить имитационные модели проектируемых АСУ ТП блоками оценки их эффективности на этапе скрутки витой пары с точки зрения регулярности производимых РЧК.

Важно отметить, что в отличие от описанного предлагаемого робастного регулятора оптимальные настройки стандартного (тактируемого по времени) пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора, соответствующие минимуму интегральной квадратичной оценки, приводят к дисперсии модуля входного коэффициента отражения РЧК в 60 раз худшей, чем настройки данного регулятора, оптимизированного по критерию минимума дисперсии модуля входного коэффициента отражения. Указанное обстоятельство делает неприемлемыми типовые настройки при оптимизации управления ТПП РЧК, описанные в первом подходе [4].

**Оценка эффективности критериев оптимальности.** Для оценивания эффективности типовых критериев оптимальности качества управления были проведены аналитическая оптимизация ПИ-регулятора и оптимальная настройка на имитационной модели эквивалентного ЦР. Анализ показал отрицательное влияние оптимизации по типовым критериям на нерегулярность РЧК, что обусловлено формой оптимального возмущённого процесса системы, имеющей колебательный характер [4, 6, 7].

Как правило, в ЦС используется ЦР второго порядка, который при соответствующей настройке параметров  $q_0$ ,  $q_1$  и  $q_2$  адекватен непрерывному пропорционально-интегрально-дифференциальному регулятору и имеет передаточную функцию вида

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

Соответствующий алгоритм управления второго порядка имеет вид

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2).$$

Настройка параметров  $q_i$  осуществляется перемещением регулярного симплекса на плоскости  $\{q_i\}$  по результатам расчёта произвольного критерия оптимальности  $Q$  до достижения его минимума (например,  $Q = \sum e^2(k) = \min$ ) [4, 22].

К структурно-оптимизируемым ЦР относится известный терминальный регулятор, который обладает большей вариабельностью и может обеспечить практически любую форму переходного процесса введением в модель объекта управления виртуальных нулей и полюсов, равных, но не сокращаемых [4, 10, 12, 23].

Предлагаемый терминальный аperiodический регулятор строится как известный аperiodический регулятор, обеспечивающий окончание переходного процесса цифровой САУ за число тактов (интервалов квантования по времени  $T_0$ ), равное порядку модели объекта управления  $n$  [10, 16, 23].

А для формирования кривой возмущённого процесса  $y(k)$  заданного вида в исходную ДПФ объекта управления  $G_0(z)$  добавляются виртуальные устойчивые нули и полюса, равные, но несокращаемые [15, 16] и обуславливающие длительность и форму переходного процесса системы в соответствии с выражениями (14)–(17):

$$G_0(z) = \frac{B(z)}{A(z)} \frac{K(z)}{K(z)}, \quad (14)$$

где  $K(z)$  — вводимый корректирующий полином, который выбирается в виде

$$K(z) = \prod_{i=1}^n (1 - z_i z^{-1}) = \sum_{k=0}^{\infty} g(k) z^{-k}, \quad (15)$$

где  $z_i$  —  $i$ -й виртуальный полюс, влияющий на форму переходного процесса ЦСАУ;  $g(k)$  —  $k$ -й отсчёт импульсной переходной функции синтезируемой системы.

При таком выборе корректирующего полинома  $K(z)$  ДПФ цифрового терминального аperiodического регулятора имеет вид [15, 16]

$$G_p(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{q_0 A(z) \prod_1^m (1 - z_i z^{-1})}{1 - q_0 B(z) \prod_1^m (1 - z_i z^{-1})}. \quad (16)$$

Соответствующая ДПФ замкнутой системы имеет вид, который определяет задаваемую форму переходного процесса:

$$G(z) = q_0 B(z) K(z), \quad (17)$$

где  $q_0 = (b_0 + b_1 + \dots + b_n)^{-1}$ ,  $b_i$  — параметры полинома  $B(z)$ , модели объекта управления.

Время переходного процесса системы определяется числом введённых нулей и полюсов, а желаемая форма переходного процесса может быть задана видом вводимого корректирующего полинома  $K(z)$ , определяющего виртуальные нули и полюса, и их оптимизацией на плоскости настроек ЦР [7, 11, 12] методом эмпирической настройки перемещения регулярного симплекса.

Если важнейшей эксплуатационной характеристикой РЧК является затухание, как, например, для сверхпроводящих кабелей [9, 10], то обобщённым критерием качества (второго критерия оптимальности) следует выбрать вклад нерегулярности в затухание сверх-

проводящего кабеля [4], определяемый через среднее значение выражения (7) на отрезке частот  $[g_1, g_2]$ , соответствующем согласно (9) отрезку  $[f_1, f_2]$  [15]:

$$\Delta\alpha l = K(f) \frac{1 - \exp(-4\alpha l)}{\alpha} f^2 S_Z\left(\frac{2f}{v}\right),$$

где  $K(f)$  — частотно-зависимый коэффициент, определяемый высокочастотными свойствами изоляционного материала и требующий эмпирического уточнения для каждого диэлектрика изоляции РЧК;  $\Delta\alpha l$  — приращение затухания РЧК, обусловленное нерегулярностью с известной СПМ  $S_Z(g)$ .

**Повышение регулярности РЧК.** В соответствии с выражением (10) минимизация нерегулярности РЧК может достигаться двумя путями.

Стандартный (первый) путь — минимизация СПМ параметров кабеля  $p_i(x)$  построением типовых САУ стабилизации с ЦР, настройка которых оптимизируется по быстрейшему [4]. Недостатки данного пути — ограничение частоты среза системы стабилизации инерционностью объекта управления и неоптимальность колебательной формы амплитудно-частотной характеристики ЦС по возмущающему воздействию [4].

Второй путь следует из (12), так как второе слагаемое, определяемое синфазными СПМ  $L_{ij}(g)$ , можно сделать отрицательным, включив межконтурные ЦР с дискретной передаточной функцией  $C_{ij}(z)$  [24], параметры которого настраиваются перемещением регулярного симплекса по плоскости настроек ЦР в такую точку настроек, при которой формирующаяся взаимная корреляционная функция  $i$ -го и  $j$ -го параметров обусловит желаемую форму и знак синфазного спектра  $L_{ij}(g)$  [4, 6, 7, 25].

В качестве межконтурного регулятора удобно выбрать модифицированный цифровой аperiодический регулятор с добавлением устойчивых виртуальных нулей и полюсов в модель объекта управления (терминальный регулятор) [15, 24, 25]. Вариации данных нулей и полюсов и позволяют менять форму  $L_{ij}(g)$ , подстраивая её под желаемый вид, компенсирующий первые слагаемые выражения (12), что приводит к дальнейшей минимизации  $S_Z(g)$ , т. е. понижает уровень нерегулярности кабеля и увеличивает его пропускную способность.

Критерием оптимальности  $i$ -й ЛСАУ можно рассматривать минимизацию вклада ЛСАУ в дисперсию КСВН ( $f$ ) [4]:

$$D_{k_i}(f) = \frac{4 - \pi}{\pi} \frac{\pi^2 (2f/v)^2}{Z_0^2 a_0 \sqrt{f}} S_{Z_i}\left(\frac{2f}{v}\right),$$

где  $2f/v = g$  — пространственная частота резонирующей гармоники;  $S_{Z_i}(2f/v)$  — спектральная плотность возмущённого процесса  $i$ -й ЛСАУ на резонансной частоте [4].

Сумма интегралов от данного выражения в пределах рабочего диапазона частот  $[f_1, f_2]$  при  $i = \overline{1, n}$  может рассматриваться как обобщённый критерий оптимальности  $Q_{\text{ср}}$  комплекса  $n$  локальных систем автоматической стабилизации, а оценки спектральных плотностей удобно получать с помощью известного автоматизированного комплекса [26]

$$Q_{\text{ср}} = \frac{1}{f_2 - f_1} \int_{f_1}^{f_2} (4 - \pi) \pi \frac{(2f/v)^2}{Z_0^2 a_0 \sqrt{f}} S_Z\left(\frac{2f}{v}\right) df.$$

**Заключение.** При автоматизации экструзионной линии, изолирующей кабельную жилу, внедрение робастного регулятора диаметра изоляции позволило реализовать техно-

логический процесс экструзии без режима останова линии при замене приёмных катушек. Вместо этого реализован непрерывный технологический процесс в режиме уменьшения скорости тяги без останова [4].

Аналогичная проблема работы автоматической стабилизации диаметра на переменной скорости актуальна и в башне вытяжки оптоволокна, где также присутствует мерное колесо, обеспечивающее измерение длины волокна. Таким же образом можно тактировать цифровой контур стабилизации диаметра волокна, обеспечивающий допуск 0,1 мкм даже при вариации скорости вытяжки.

Разработанная методология оптимальной цифровой автоматизации ТПП длинномерных кабельных изделий реализована и в производствах градиентных оптических волокон, на основе которых строятся совершенные оптические линии связи с наибольшей пропускной способностью [4].

При автоматизации башни вытяжки градиентного оптического волокна осуществлён переход от механического контактного датчика натяжения вытяжки к разработанному бесконтактному датчику натяжения, внедрение которого в фирме OPT Ltd (Англия) позволило увеличить выход годного волокна до 90 % [27, 28, 29].

Применение разработанных робастных алгоритмов автоматического управления скоростью и натяжением вытяжки сделали возможным исключить ручной режим разгона и стабилизировать диаметр оптического волокна уже на этапе автоматического разгона, что и обеспечило увеличение «выхода годного» волокна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ионов А. Д.** Статистически нерегулярные оптические и электрические кабели связи. Томск: Радио и связь, 1990. 231 с.
2. **Mullen I., Pritchard A.** The statistical prediction of voltage standing wave ratio // IRE Trans. Microwave Theory and Techniques. 1957. **5**, N 2. P. 127–130. DOI: 10.1109/TMTT.1957.1125111.
3. **Дорезюк Н. И., Попов М. Ф.** Радиочастотные кабели высокой регулярности. М.: Связь, 1979. 104 с.
4. **Чостковский Б. К.** Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи. М.: Машиностроение, 2009. 189 с.
5. **Чостковский Б. К., Юдашкин А. А.** Активная идентификация динамических объектов типа Гаммерштейна // Автоматика и телемеханика. 1992. № 1. С. 96–103.
6. **Чостковский Б. К., Митрошин В. Н.** Автоматизация процесса экструзии пористой кабельной изоляции на основе цифрового регулятора // Автометрия. 2017. **53**, № 4. С. 74–83. DOI: 10.15372/AUT20170409.
7. **Митрошин В. Н., Рогачев Г. Н., Чостковский Б. К., Рогачев Н. Г.** Применение нечёткой логики в задачах оптимизации непрерывно-дискретных систем управления многооперационными технологическими процессами // Автометрия. 2019. **55**, № 4. С. 71–78. DOI: 10.15372/AUT20190408.
8. **Чостковский Б. К., Митрошин В. Н.** Стратегия синтеза и оптимизации цифровых систем управления технологическими процессами производства кабелей // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2017. № 4(56). С. 69–75.
9. **Попов М. Ф., Чостковский Б. К., Юдашкин А. А.** Характеристики нерегулярного сверхпроводящего кабеля для цифровых систем передачи // Кабельная техника. 1995. № 7(245). С. 11–14.
10. **Митрошин В. Н.** Автоматическое управление объектами с распределёнными параметрами в технических процессах изолирования кабелей связи. М.: Машиностроение, 2007. 182 с.
11. **Чостковский Б. К., Денисов В. Ю., Дьяконов А. И.** Оптимизация многосвязного регулирования симплексным методом // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2013. № 4(40). С. 59–99.

12. **Чостковский Б. К., Митрошин В. Н.** Автоматизация процесса экструзии пористой кабельной продукции на основе цифрового регулятора // *Автометрия*. 2017. **53**, № 4. С. 74–83. DOI: 10.15372/AUT20170409.
13. **Karbowiak A. E.** Investigation of signal distortion in cables caused by imperfections in cable manufacture // *Proceeding of the Inst. Elec. Eng.* 1974. **121**, Iss 6. P. 419–431.
14. **Ефимов И. Е., Останькович Г. А.** Радиочастотные линии передачи. Радиочастотные кабели. М.: Связь, 1997. 408 с.
15. **Чостковский Б. К., Юдашкин А. А.** Анализ частотных и временных характеристик сверхпроводящей линии передачи информации // *Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки*. 1994. № 1. С. 1–5.
16. **Чостковский Б. К., Колпащиков С. А.** Синтез цифрового регулятора терминальной системы позиционирования динамического объекта // *Сб. матер. Всеросс. науч.-техн. конференции «Актуальные проблемы ракетно-космической техники и её роли в устойчивом социально-экономическом развитии общества»*. Самара: ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”», 2009. С. 96–98.
17. **Чостковский Б. К.** Математическая модель формирования обобщённых параметров качества нерегулярных кабелей связи в стохастической постановке // *Вестн. СамГТУ. Сер. Физико-математические науки*. 2006. № 42. С. 147–161.
18. **Чостковский Б. К., Колпащиков С. А.** Синтез цифрового регулятора терминальной системы позиционирования динамического объекта // *Вестн. Сам. гос. аэрокосм. ун-та*. 2010. № 2(22). С. 238–240.
19. **Прохоров С. А.** Прикладной анализ неэквидистантных временных рядов. Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2001. 216 с.
20. **Чостковский Б. К., Митрошин В. Н.** Алгоритмизация операционного и приёмочного контроля технологических процессов кабельных производств // *Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки*. 2018. № 2(58). С. 47–52.
21. **Власов В. Е.** Кабели цифровых сетей электросвязи. Конструирование, технологии, применение. М.: Эко-Трендз, 2005. 216 с.
22. **Чостковский Б. К., Смородинов Д. А.** Математическая модель витой пары радиочастотного кабеля как объекта управления // *Вестн. СамГТУ. Сер. Физико-математические науки*. 2008. № 1(16). С. 113–118.
23. **Isermann R.** Digital control methods for power station plants based on identified process models // *Proc. of the IFAC Symposium on Automatic Control in Power Generation, Distribution and Protection*. Pretoria, South Africa, 15-19 Sept., 1980. **13**, Iss. 8. P. xliii-lxiv.
24. **Изерман Р.** Цифровые системы управления: Перевод с англ. С. П. Забродина и др. М.: Мир, 1984. 541 с.
25. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Сов. радио, 1969. 748 с.
26. **Марпл (мл.) С. Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения: Пер. с англ. О. И. Хабарова, Г. А. Сидоровой /Под ред. И. С. Рыжака. М.: Мир, 1990. 584 с.
27. **Пат. RU 2154812 С2.** Устройство измерения натяжения вытяжки оптического волокна /Б. К. Чостковский, Д. Б. Чостковский, Г. Штайнике, М. Виттманн. Заявка: 01.06.1998. Оpubл. 20.08.2000.
28. **Pat. UK GB 2291507 A.** Method and apparatus for measuring tension in a moving strand /B. Chostkovskiy. Publ. 24.01.1996.
29. **Pat. WO 96/01984.** Method and apparatus for measuring tension in a moving strand /B. Chostkovskiy. International Application Published under the Patent Cooperation Treaty (PCT). Publ. 25.01.1996

*Поступила в редакцию 29.09.2022*

*После доработки 09.12.2022*

*Принята к публикации 29.12.2022*