

# Многоуровневая иерархическая система оптимального управления совмещёнными технологическими процессами производства радиочастотных кабелей высокой регулярности\*

Чостковский Б.К., Митрошин В.Н.

Самарский государственный технический университет  
г. Самара, Российская Федерация  
[vmitroshin@mail.ru](mailto:vmitroshin@mail.ru)

**Аннотация.** Предложена методология построения и оптимизации структуры и параметров трехуровневой иерархической системы автоматического контроля и управления процессом производства радиочастотного кабеля. В основе методологии лежит разработанная стохастическая имитационная модель формирования введенных обобщенных параметров и показателей качества нерегулярных кабелей коаксиальной и симметричной конструкций. Предложен подход к синтезу управления на трех уровнях технологического процесса – от контроля технологических режимных параметров до управления комплексом связанных локальных систем автоматической стабилизации формирующихся и контролируемых первичных и вторичных параметров передачи нерегулярного кабеля. Предложенный обобщенный критерий оптимальности управления обеспечивает минимизацию уровня нерегулярности производимых кабелей.

**Ключевые слова:** радиочастотные кабели, производство, оптимальное управление, иерархическая система.

## НЕРЕГУЛЯРНЫЙ КАБЕЛЬ

Непрерывно возрастающие потоки различных видов информации, которую необходимо передавать на большие расстояния с большой достоверностью требуют развития и улучшения качества электрической связи. В основе электрического канала связи лежит линия связи, реализуемая, как правило, на основе электрического кабеля связи. В этом случае канал связи называют проводным каналом [1-3].

Проводные каналы связи создаются с помощью направляющих систем, в качестве которых могут использоваться двухпроводные цепи, коаксиальные и симметричные. Двухпроводная симметричная цепь может быть организована по низкочастотным кабелям или с помощью систем передачи (высокочастотные цепи), позволяющих по одной цепи передавать одновременно информацию различных видов.

Неотъемлемой частью радиотехнических систем, таких как радиосвязь, радиолокационные станции, телевидение являются радиочастотные кабели, в том числе кабели для передачи данных (LAN-кабели) и для систем кабельного телевидения.

Качество канала и его пропускная способность определяются первичными параметрами передачи двухпро-

водной направляющей системы связи  $R, L, C, G$  (соответственно сопротивлением, индуктивностью, емкостью и проводимостью), зависимость которых от измеряемых и регулируемых в ходе технологических процессов воздействий описана в [4].

Если значение первичных параметров остается неизменным по всей длине кабеля  $x$ , такая цепь называется однородной (регулярной).

## МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Распространение электромагнитной энергии вдоль цепи описывается обобщенной системой телеграфных уравнений, решение которой определяет падающую волну и отраженную волну, обусловленную стохастическими нерегулярностями кабеля.

Известно частное решение обобщенной системы телеграфных уравнений для гармонической нерегулярности с периодом  $L$  и пространственной частотой  $g$ . Ей соответствует взаимодействующая гармоника передаваемого сигнала с частотой  $f$  [5].

$$f = gV/2 = V/2L, \quad (1)$$

где  $V$  – скорость распространения сигнала по кабелю.

Поэтому каждая гармоническая составляющая нерегулярности обуславливает появление пика отражения в обобщенной характеристике нерегулярности – частотной зависимости коэффициента стоячей волны напряжения  $K(f)$  [6].

Отсюда следует, что параметры законов управления, реализуемых на среднем уровне управления, на котором стабилизируются первичные параметры кабеля, существенно влияют на передаточные функции контуров систем автоматической стабилизации (САС) по возмущающим воздействиям  $W_i(p)$ , определяемым передаточными функциями соответствующих объектов управления  $W_{oi}(p)$  и регуляторов  $W_{ci}(p)$ :

$$W_i(p) = \frac{1}{1 + W_{ci}(p) \cdot W_{oi}(p)}. \quad (2)$$

\* Работа поддержана грантом РФФИ 18-08-00506-а. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Международной научно-технической конференции "Пром-Инжиниринг" (ICIE-2019), <http://icie-rus.org>

При реализации дискретных (цифровых) регуляторов (ЦР) соответствующие дискретные передаточные функции имеют вид:

$$G_i(z) = \frac{1}{1 + G_{ci}(z) \cdot G_{oi}(z)}, \quad (3)$$

где  $G_{ci}(z)$  – передаточная функция цифрового регулятора  $i$ -ой локальной САС среднего уровня управления;  $G_{oi}(z)$  – дискретная передаточная функция объекта управления  $i$ -ой локальной САС (например, САС диаметра экструдированной изоляции).

Таким образом, амплитудно-частотные характеристики систем, соответствующие (2), в совокупности со спектральными плотностями возмущающих воздействий  $S_{fi}(\omega)$ , определенными в ходе предварительного обследования технологического оборудования, формируют спектральные плотности соответствующих частотных параметров кабеля:

$$S_i(\omega) = |W_i(j\omega)|^2 \cdot S_{fi}(\omega) = |G_i(j\omega)|^2 \cdot S_{fi}(\omega). \quad (4)$$

Отсюда вытекает методология проектирования рассматриваемой трехуровневой управляемой системы “снизу-вверх” и “сверху-вниз”, суть которой заключается в следующем.

Случайные флуктуации технологических режимных параметров (ТРП) нижнего (первого) уровня управления исследуются методами корреляционно-спектрального анализа на этапе предварительного обследования технологического оборудования. По результатам анализа строятся параметрические модели соответствующих случайных процессов в виде передаточных функций формирующих фильтров [7].

Те параметры, которые измеряются встроенными в оборудование датчиками, подвергаются стабилизации “на проход” локальными системами автоматической стабилизации, составляющими второй уровень управления. Речь идет о САС диаметра и погонной емкости изоляции, ее эксцентриситета. Кроме измеряемых параметров изготавливаемого кабеля на втором уровне используются косвенные оценки обобщенных параметров (например, относительной диэлектрической проницаемости изоляции), вычисляемые “на проход” по сигналам датчиков непосредственно измеряемых параметров кабеля.

Третий уровень управления предполагает компенсацию влияния динамических ошибок САУ второго уровня введением перекрестных межконтурных связей, компенсирующих влияние ошибок медленно-действующих САС на выбранный обобщенный показатель качества управления [8], а также совместную оптимизацию настроек комплекса всех локальных САУ на имитационной модели трехуровневой системы по глобальному критерию, учитывающему суммарный вклад регулируемых параметров в обобщенный показатель качества, отражающий эксплуатационные показатели качества, контролируемые в ходе приемо-сдаточных испытаний кабельной продукции [4].

Очевидно, что реализация комплекса САС базируется на существующем наборе систем автоматического контроля параметров, нуждающихся в автоматической стабилизации [4].

## АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Главной целью автоматического контроля и управления технологическими процессами производства кабелей (ТППК) является достижение максимальной регулярности выпускаемых кабелей, что невозможно без измерения технологических режимных параметров (ТРП) оборудования штатными датчиками, первичных параметров кабеля и косвенного оценивания обобщенных параметров, характеризующих качество кабеля.

Использование измеряемых датчиками сигналов, соответствующих первичным параметрам кабеля и косвенных оценок параметров, недоступных измерению “на проход”, позволяет в режиме реального времени оценивать вторичные параметры передачи и обобщенные параметры кабеля, являющиеся результатом построения стохастической модели процесса формирования нерегулярности кабеля [4].

Важнейшим компонентом технологического оборудования кабельных производств является экструзионная линия, совмещающая ряд технологических операций, выполняемых “на проход” медной жилы и обеспечивающая нанесение на жилу вспениваемой полиэтиленовой изоляции, ее охлаждение и контроль параметров, прежде всего диаметра изоляции  $D_{in}(x)$  и погонной емкости изолированной жилы  $C_{in}(x)$  датчиками, установленными на линии. Сигналы этих датчиков позволяют косвенно оценивать “на проход” относительную диэлектрическую проницаемость вспененной изоляции  $\varepsilon_{in}(x)$ , которая определяется степенью пористости изоляции за счет введения в цилиндр экструдера газообразного азота [9, 10].

Косвенная оценка относительной диэлектрической проницаемости вспененной изоляции  $\varepsilon_{in}(x)$  выполняется по алгоритму, который достаточно точно линеаризуется и выражается через центрированные значения измеряемых параметров:

$$C_{in}(x) = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{D_{in}(x)}{d}} \cdot \varepsilon_{in}(x) \approx C_0 + K_D \cdot \overset{\circ}{D}_{in}(x) + K_\varepsilon \cdot \overset{\circ}{\varepsilon}_{in}(x), \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ , [Ф·м<sup>-1</sup>] – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $d$  – диаметр медного проводника;  $K_D$  и  $K_\varepsilon$  – чувствительности погонной емкости к диаметру и относительной диэлектрической проницаемости изоляции соответственно;  $\overset{\circ}{D}_{in}(x)$  и  $\overset{\circ}{\varepsilon}_{in}(x)$  – центрированные значения параметров изолированной жилы;  $C_0$  – номинальное значение погонной емкости изолированной жилы.

Здесь необходимо отметить, что разработанный датчик погонной емкости [11] измеряет величину емкости изолированной жилы на длине, равной длине измерительного электрода первичного трубчатого преобразователя, помещенного в водную среду, т.е. дает сглаженное значение  $C_{in}(x)$ . Поэтому перед вводом в алгоритм (5) измеряемая величина  $\overset{\circ}{D}_{in}(x)$  должна сглаживаться цифровым алгоритмом скользящего среднего по  $N$  последним отсчетам, снимаемым с интервалом квантования  $T_0$ :

$$y(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=k-(N-1)}^k x(n) = y(k-1) + \frac{1}{N} [x(k) - x(k-N)]. \quad (6)$$

Следует также учитывать, что при дискретизации временных сигналов с интервалом квантования  $T_0$  цифровой фильтр (6) не эффективен на частотах  $\omega > \frac{2\pi}{NT_0}$ . Данная

частота, в соответствие с построенной моделью нерегулярного кабеля не должна превышать частоту среза  $\omega_c$  датчиков АСУТП, определяемую верхней частотой передаваемого по кабелю сигнала  $f_h$  и скоростью протяжки изготавливаемого кабеля  $V_p$ :

$$\omega_c = \frac{4\pi V_p f_h}{V}. \quad (7)$$

Применение же алгоритма (6) обеспечивает частоту среза

$$\omega_c = \frac{2\pi}{NT_0}. \quad (8)$$

Описанный подход следует применять и к обработке всех измеряемых сигналов параметров кабеля, вводимых в алгоритмы косвенных оценок контролируемых параметров и обобщенных показателей качества. Такие обобщенные параметры и показатели необходимы для построения имитационной модели управляемой иерархической системы для оценки эффективности принятых решений по контролю и управлению в проектируемой иерархической системе.

Предложены следующие обобщенные параметра и показатели качества кабелей, требования к которым преобразуются в обобщенные показатели качества управления комплекса САС, определяемые косвенными оценками.

1. Вязкость полимера в процессе экструзии в обобщенном виде характеризует адекватность температурного профиля нагрева цилиндра экструдера и меняющегося показателя текучести загружаемого гранулированного полимера.

Для контроля вязкости из общего момента нагрузки электропривода экструдера выделяется составляющая, пропорциональная вязкости полимера в зоне дозирования. При этом вязкость экструдированного полимера определяет момент сопротивления, пропорциональный угловой скорости шнека и коэффициенту  $K_v$  [12]:

$$K_v = \frac{K_m \cdot R_{\omega i}}{D_{\omega}}, \quad (9)$$

где  $K_m$  – коэффициент пропорциональности между вращающим моментом  $m$  и током якоря электропривода  $i$ , определяемый конструкцией двигателя и потоком намагничивания;  $R_{\omega i}$  – взаимный корреляционный момент вариаций угловой скорости  $\omega$  и тока якоря  $i$ ;  $D_{\omega}$  – дисперсия угловой скорости шнека  $\omega$ .

Управление вязкостью экструдированного расплава осуществляется изменением температуры головки экструдера.

2. Профиль волнового сопротивления коаксиального кабеля с гофрированным внешним проводником (например, РК75-4-113) [4] записывается:

$$Z(x) = \left[ \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{D_{in}(x) - \delta(x)}{d} \cdot \left( \frac{1}{C_{in}(x)} + \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \cdot \frac{\delta(x)}{D_{in}(x)} \right) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (10)$$

где  $\mu_0$  – абсолютная магнитная проницаемость вакуума;  $\delta(x)$  – вариации глубины гофрирования внешнего проводника, регулируемые межосевым перемещением гофрирующих валков.

3. Рабочая емкость линии из витой пары LAN-кабеля, рассчитанная методом конформных преобразований [13], описывается выражением:

$$C(x) = \frac{\pi\epsilon_0\epsilon_1(x)\epsilon_2(x)\epsilon \cdot (l + p + q)}{\ln k \cdot [\epsilon_2(x)\epsilon l + \epsilon_1(x)\epsilon p + \epsilon_1(x)\epsilon_2(x)q]}, \quad (11)$$

где  $\epsilon_1(x)$  и  $\epsilon_2(x)$  – относительные диэлектрические проницаемости изоляции жил витой пары;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды между изолированными жилами;  $k, l, p, q$  – константы, определяемые геометрическими параметрами витой пары [13].

Линеаризация выражения (11) позволила оценить чувствительность обобщенного показателя  $C(x)$  к стабилизируемым параметрам изолируемых жил. Это может быть использовано для построения системы, обеспечивающей компенсацию влияния на рабочую емкость вариаций одного параметра за счет изменения другого.

Вариации частных параметров кабеля – его геометрических и электрических параметров  $P_i(x)$ , формируемых в ходе технологического процесса, должны рассматриваться как динамические ошибки комплекса локальных САС, составляющих средний уровень управления и подверженных влиянию возмущающих воздействий нижнего уровня, математические модели которых в виде формирующих фильтров построены на этапе предварительного обследования объектов управления [4].

Автоматическая стабилизация измеряемых параметров кабеля выполняется с помощью цифровых регуляторов второго порядка с дискретной передаточной функцией [14]:

$$G_{Cont}(z) = \frac{Q(z)}{U(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}}. \quad (12)$$

Оптимизация всех  $\{q_i\}$  осуществляется перемещением регулярного симплекса в пространстве настроек  $\{q_i\}$   $i$ -го цифрового регулятора до тех пор, пока на построенной имитационной модели управляемой системы не будет достигнут минимум выбранного критерия оптимальности, например, критерия минимума производной ошибки [14, 15].

Однако построенная стохастическая модель нерегулярности коаксиального кабеля позволяет использовать в качестве критерия оптимальности критерий минимума дисперсии и математического ожидания коэффициента стоячей волны напряжения  $K(f)$  на частоте  $f$  или на отрезке частот  $[f_1, f_2]$ .

$$D[K(f)] = \frac{4\pi^2}{Z_0^2 V^2 a_0} \cdot \sqrt{f^3} \cdot S_z \left( \frac{2f}{V} \right), \quad (13)$$

$$M[K(f)] = 1 + \sqrt{\pi} \cdot \sqrt{D[K(f)]}, \quad (14)$$

где  $a_0$  – параметр, описывающий частотную зависимость коэффициента затухания [2]:

$$\alpha = a_0 \cdot \sqrt{f}, \quad (15)$$

$S_z\left(\frac{2f}{V}\right)$  – значение спектральной плотности волнового сопротивления на частоте (1).

Для сравнения были рассчитаны оптимальные настройки пропорционально-интегрального регулятора по стандартному критерию минимума интегральной квадратичной ошибки и по критерию (13). Сравнение показало, что использование разработанного критерия, учитывающего влияние управляемых параметров на частотные характеристики кабеля, обеспечило в 60,4 раза более низкий уровень внутренних отражений передаваемого по кабелю сигнала [16].

Такая существенная разница объясняется тем, что оптимальная по типовому критерию система склонна к автоколебаниям на некоторой резонансной частоте. Возникающие при этом колебания гармонического вида даже с малой амплитудой обуславливают значительный пик КСВН ( $f$ ).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты основаны на математической модели нерегулярного кабеля, которая определяется решением системы обобщенных телеграфных уравнений, справедливых для любых конструкций кабеля. Поэтому данные результаты могут быть обобщены и на другие типы кабелей, например, с четверочной скруткой (рис. 1). Кроме того, при наличии специфических требований к характеристикам кабеля, возможна модификация обобщенного критерия оптимальности с выделением приоритетного диапазона частот или оптимизация не параметров передачи, а параметров взаимного влияния.

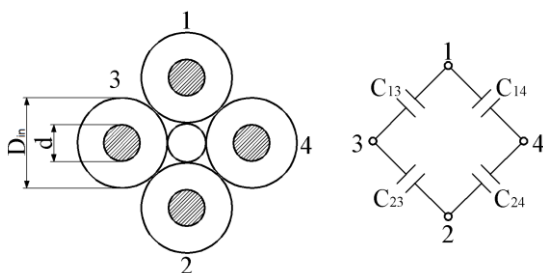


Рис. 1. Сечение звездной четверки. Частичные ёмкости

Обобщенный показатель качества  $Q(f)$  симметричных кабелей с парной и четверочной скруткой можно определять по выражению [4]:

$$Q(f) = \int_0^l q'(x) \exp^{-2\gamma(f)x} dx, \quad (16)$$

где  $q'(x)$  – функция изменения обобщенного показателя качества;  $l$  – длина кабеля;  $\gamma(f)$  – частотно-зависимый коэффициент распространения электромагнитной волны по кабелю;  $f$  – частота передаваемого по кабелю сигнала.

Качество симметричных кабелей описывается параметрами передачи и параметрами влияния. Отличи-

тельной особенностью кабелей с четверочной скруткой, используемых в магистральных линиях связи, является наличие взаимных влияний основных цепей звездной четверки, которые нужно минимизировать. В симметричных кабелях ограничения на диапазон рабочих частот обычно накладываются параметрами взаимного влияния цепей, приводящего к появлению переходных шумов, а не параметрами передачи [3, 17, 18].

В технике связи электромагнитное влияние между цепями принято выражать величинами переходных затуханий [3].

Переходное затухание характеризует степень уменьшения токов влияния при переходе из влияющей цепи в цепь, подверженную влиянию. Рассматривается два вида влияния: на ближнем (где находится источник сигнала) и дальнем (противоположном) концах.

Величина переходного затухания на ближнем конце  $A_0$  существенно меньше, чем на дальнем конце из-за суммирования токов электрического и магнитного влияний, поэтому и будет рассматриваться как обобщенный показатель качества симметричного кабеля.

Для строительной длины кабеля величина переходного затухания на ближнем конце  $A_0$  определяется величиной модуля полной электромагнитной связи на ближнем конце  $K_0$  (передаточной функции влияния на ближний конец), которая, в свою очередь, определяется характером изменения по длине кабеля  $x$  коэффициента электромагнитной связи  $N_{12}(x)$  [1, 3, 19]:

$$A_0 = \ln \frac{2}{|K_0|}, \quad (17)$$

где  $K_0$  – передаточная функция влияния на ближний конец, равная отношению наведённого тока в цепи, подверженной влиянию, к току во влияющей цепи

$$K_0 = \frac{1}{2} \int_0^l N_{12}(x) e^{-2\gamma(f)x} dx, \quad (18)$$

$$N_{12}(x) = K_{12}(x)z + \frac{M_{12}(x)}{z}, \quad (19)$$

$K_{12}$  – электрическая связь между основными цепями, равная отношению наведённого тока в цепи, подверженной влиянию, к разности потенциалов во влияющей цепи. Магнитная связь между основными цепями  $M_{12}$  равна отношению наведённой электродвижущей силы взаимной индукции в цепи, подверженной влиянию, к току во влияющей цепи.

Учитывая пренебрежимо малые величины активных составляющих электрической и магнитных связей в кабелях связи [3, 20], их можно выразить через ёмкостную связь  $C_{12}$  и индуктивную связь  $m_{12}$ . На частоте  $\omega$  электрическая и магнитная связи равны:

$$K_{12} = j\omega C_{12}, \quad (20)$$

$$M_{12} = j\omega m_{12}. \quad (21)$$

Величина ёмкостной связи  $C_{12}$  может контролироваться по величине измеряемого в ходе операционного

контроля коэффициента емкостной связи  $K_1$ . Данный коэффициент зависит от соотношения частичных емкостей между жилами четвёрки и обычно нормируется в технических условиях. Между емкостной связью и коэффициентом  $K_1$  существует соотношение [19]:

$$C_{12} = \frac{K_1}{4}. \quad (22)$$

Следует также отметить, что соотношение между величинами индуктивной и емкостной связей описывается в виде, где  $z$  – волновое сопротивление:

$$\frac{m_{12}}{C_{12}} \approx z^2. \quad (23)$$

Согласно (20), (21), (23) выражение (19) можно представить в виде:

$$N_{12}(x) \approx j\omega 2z C_{12}(x) = j\omega z \frac{K_1(x)}{2}. \quad (24)$$

Полученные зависимости (17), (18) и (24) описывают взаимосвязь обобщенного показателя качества  $A_0(f)$  с частным параметром качества  $K_1$ , регулирование которого приводит к минимизации уровня взаимных влияний основных цепей, организуемых по четвёрке симметрично-го кабеля.

$$K_1 = (C_{13} + C_{24}) - (C_{14} + C_{23}). \quad (25)$$

Здесь  $C_{ij}$  – частичные емкости между  $i$ -ой и  $j$ -ой жилами четверки (см. рис. 1).

#### ЛИТЕРАТУРА

- Гроднев И.И. Теория направляющих систем связи. / И.И. Гроднев, В.О. Шварцман. – М.: Связь, 1978. – 296 с.
- Гроднев И.И. Коаксиальные кабели связи. / И.И. Гроднев, П.А. Фролов. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
- Гроднев И.И. Линии связи: учебник для вузов. / И.И. Гроднев, С.М. Верник. – М.: Радио и связь, 1988. – 544 с.
- Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.
- Дорезюк Н.И. Радиочастотные кабели высокой регулярности. / Н.И. Дорезюк, М.Ф. Попов. – М.: Связь, 1979. – 104 с.
- Ефимов И.Е. Радиочастотные линии передачи / И.Е. Ефимов, Г.А. Останкович. – М.: Связь, 1977. – 408 с.
- Чостковский Б.К. Моделирование и алгоритмизация процессов управления в стохастических системах с цифровыми регуляторами: учебное пособие. – Самара: СамГТУ, 2013. – 146 с.
- Митрошин В.Н. Многопараметрическое управление производством кабелей связи на основе прогнозирующих моделей // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 37-44.
- Бонвин П.-И. Линии изолирования коаксиальных кабелей с процессом физического вспенивания Extrucell™ / П.-И. Бонвин, Р. Родригез, А.В. Чамов // Кабель-news. – 2010. – № 2. – С. 13-18.
- Митрошин В.Н. Автоматизация технологических процессов производства кабелей связи. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 140 с.
- Брюханов О.Ф. Исследование измерительного преобразователя погонной емкости жил кабелей связи / О.Ф. Брюханов, В.И. Попов // Автоматическое управление непрерывными технологическими процессами: Межвуз. сб. научн. тр. – Куйбышев: изд-во КПТИ, 1976. – С. 13-20.
- Колесников К.Д., Уклеин Д.А., Чостковский Б.К. Устройство для контроля вязкости полимера в процессе экструзии // А.С. СССР 1712832. 1992. Бюл. №6.
- Чостковский Б.К. Математическая модель витой пары радиочастотного кабеля объекта управления / Б.К. Чостковский, Д.А. Смородинов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. – 2008. – №1(16). – С. 113-118.
- Chostkovskii V.K. Automation of Extrusion of Porous Cable Products Based on a Digital Controller / В.К. Chostkovskii, V.N. Mitroshin // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2017. – Vol. 53, is. 4. – P. 371-378.
- Чостковский Б.К. Оптимизация многосвязного регулирования симплексным методом / Б.К. Чостковский, В.Ю. Денисов, А.И. Дьяконов // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 59-66.
- Чостковский Б.К. Алгоритмизация и частотная оптимизация управления процессами производства кабелей связи // Вестник Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. – 1998. – Вып. 5. – С. 28-35.
- Андреев В.А. Теория электромагнитных влияний между цепями связи. – М.: Энергия, 1999. – 328 с.
- Шварцман В.О. Взаимные влияния в кабелях связи. – М.: Связь, 1966. – 430 с.
- Клейн В. Теория взаимного влияния в линиях связи. – М.-Л.: ГЭИ, 1957. – 326 с.
- Ионов А.Д. Линии связи: учеб. пособ. для вузов / А.Д. Ионов, Б.В. Попов. – М.: Радио и связь, 1990. – 167 с.

# Multi-level Hierarchical System of Optimal Control of Combined Technological Processes for the Production of High-Quality Radio-Frequency Cables

Chostkovskiy B.K., Mitroshin V.N.

Samara State Technical University

Samara, Russian federation

[vmitroshin@mail.ru](mailto:vmitroshin@mail.ru)

**Abstract.** In this paper the methodology of constructing and optimizing the structure and parameters of a three-level hierarchical system of automatic control of radio-frequency cable manufacturing process is proposed. The methodology is based on the developed stochastic simulation model of the formation of the introduced generalized parameters and quality indicators of irregular cables of coaxial and symmetrical designs. An approach to the synthesis of control at three levels of the technological process is proposed - from controlling technological regime parameters to controlling a set of connected local systems of automatic stabilization of the forming and controlled primary and secondary transmission parameters of an irregular cable. The proposed generalized criterion for optimal control minimizes the level of irregularity of the cables produced.

**Keywords:** radio-frequency cables, production, optimal control, hierarchical system.

## REFERENCES

1. Grodnev I.I., Schwartzman V.O. *Teoriya napravlyayushchikh sistem svyazi* [Theory of Guiding Communications Systems], Moscow, Svyaz' Publ., 1978, 296 p. (in Russ.)
2. Grodnev I.I., Frolov P.A. *Koaksial'nye kabeli svyazi* [Coaxial Communication Cables], Moscow, Radio I Svyaz' Publ., 1983, 208 p. (in Russ.)
3. Grodnev I.I., Vernik S.M. *Linii svyazi: Uchebnik dlya vuzov* [Communication lines: a textbook for universities], Moscow, Radio I Svyaz' Publ., 1988, 544 p. (in Russ.)
4. Chostkovskiy B.K. *Metody i sistemy optimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi protsessami proizvodstva kabeley* [Methods and systems for optimal control of technological processes of cable production], Moscow, Mashinostroenie, 2009, 190 p. (in Russ.)
5. Dorezyuk N.I., Popov M.F. *Radiochastotnye kabeli vysokoy regul'yarnosti* [High Frequency Radio Frequency Cables], Moscow, Svyaz' Publ., 1979, 104 p. (in Russ.)
6. Efimov I.E., Ostan'kovich G.A. *Radiochastotnye linii peredachi* [Radio-Frequency Transmission Lines], Moscow, RF Cables. Svyaz' Publ., 1977, 408 p. (in Russ.)
7. Chostkovskiy B.K. *Modelirovanie i algoritimizatsiya protsessov upravleniya v stokhasticheskikh sistemakh s tsifrovymi regul'yatorami: uchebnoe posobie* [Control Processes Modeling and Algorithmization in Stochastic Systems with Digital Regulators], Samara, SSTU Publ., 2013, 146 p.
8. Mitroshin V.N. Multiparameter Control of Communication Cables Production based on Predictive Models [Mnogoparametricheskoe upravlenie proizvodstvom kabeley svyazi na osnove prognoziruuyushchikh modeley], *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhnicheskii* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series], 2013, no. 4, pp. 37-44. (in Russ.)
9. Bonvin P.-I., Rodriguez R., Chamov A.V. Insulation lines for coaxial cables with Extrucell™ physical foaming process [Linii izolirovaniya koaksial'nykh kabeley s protsessom fizicheskogo vspenivaniya Extrucell™], *Kabel'-news* [Cable-news], 2010, vol. 2, pp. 13-18. (in Russ.)
10. Mitroshin V.N. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva kabeley svyazi* [Automation of Production Processes of Communication Cables], Moscow, Mashinostroenie-1, 2006. (in Russ.)
11. Bryuhanov O.F., Popov V.I. Research of the measuring converter of running capacity of communication cable cores [Issledovanie izmeritel'nogo preobrazovatela pogonnoy emkosti zhil kabeley svyazi], *Avtomaticheskoe upravlenie nepreryvnymi tekhnologicheskimi protsessami: Mezhd. sb. nauchn. tr.* [Automatic control of continuous technological processes], Kuibyshev, KPTI Publ., 1976, pp. 13-20. (in Russ.)
12. Kolesnikov K.D., Uklein D.A., Chostkovskii B.K. *Ustroystvo dlya kontrolya vyazkosti polimera v protsesse ekstruzii* [An Apparatus for Polymer Viscosity Control During Extrusion Process], Author's Certificate, No. 1712832 IPC G01N11/14, BI No. 6, 1992. (in Russ.)
13. Chostkovskii B.K., Smorodinov D.A. Mathematical Model for a Twisted Pair of a Radio-Frequency Cable for Control Plants [Matematicheskaya model' vitoy pary radiochastotnogo kabelya ob'ekta upravleniya], *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Physical and Mathematical Sciences Series], 2008, no. 1(16), pp. 113-118. (in Russ.)
14. Chostkovskii B.K., Mitroshin V.N. Automation of Extrusion of Porous Cable Products Based on a Digital Controller, *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, Vol. 53, is. 4, pp. 371-378.
15. Chostkovskii B.K., Denisov V.Yu., D'yakonov A.I. Optimization of Multivariate Control by the Simplex Method [Optimizatsiya mnogosvyaznogo regulirovaniya simpleksnym metodom], *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University.

*Technical Sciences Series*], 2013, no. 4(40), pp. 59-66. (in Russ.)

16. Chostkovskii B.K. Algorithmization and frequency optimization of communication cable production process control [Algoritmizatsiya i chastotnaya optimizatsiya upravleniya protsessami proizvodstva kabeley svyazi], *Vestnik Samar. gos. tekhn. un-ta. Ser. Tekhnicheskie nauki [Vestnik of Samara State Technical University, Technical Sciences Series]*, 1998, no. 5, pp. 28-35. (in Russ.)

17. Andreev V.A. *Teoriya elektromagnitnykh vliyaniy mezhdru tsepyami svyazi* [The Theory of Electromagnetic Effects between The Communication Circuits] Moscow, Energiya Publ., 1999, 328 p. (in Russ.)

18. Shwartsman V.O. *Vzaimnye vliyaniya v kabelyakh svyazi* [Mutual Influences in Communication Cables], Moscow, Svyaz' Publ., 1966, 430 p. (in Russ.)

19. Klein V. *Teoriya vzaimnogo vliyaniya v liniyakh svyazi* [Theory of Mutual Influence in Communication Lines], Moscow-Leningrad, GEI, 1957, 326 p. (in Russ.)

20. Ionov A.D., Popov B.V. *Linii svyazi: ucheb. posob. dlya vuzov* [Communication Lines], Moscow, Radio I Svyaz' Publ., 1990, 167 p. (in Russ.)

---

#### **Библиографическое описание статьи**

Чостковский Б.К. Многоуровневая иерархическая система оптимального управления совмещёнными технологическими процессами производства радиочастотных кабелей высокой регулярности / Б.К. Чостковский, В.Н. Митрошин // *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*. – 2019. – Т.6, №1. – С. 17-23. DOI: 10.24892/RIJEE/20190103

#### **Reference to article**

Chostkovskiy B.K., Mitroshin V.N. Multi-level hierarchical system of optimal control of combined technological processes for the production of high-quality radio-frequency Cables, *Russian Internet Journal of Electrical Engineering*, 2019, vol.6, no.1, pp. 17-23. DOI: 10.24892/RIJEE/20190103