

УДК 681.5 : 621.315

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ ПОРИСТОЙ КАБЕЛЬНОЙ ПРОДУКЦИИ НА ОСНОВЕ ЦИФРОВОГО РЕГУЛЯТОРА\*

Б. К. Чостковский, В. Н. Митрошин

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

Рассматривается новый подход к синтезу автоматизированной системы контроля и управления технологическим процессом наложения пористой изоляции на токопроводящую кабельную жилу, предполагающий вместо расчёта типовых ПИД-регуляторов по известным методикам переход к структурно и параметрически оптимизируемым цифровым регуляторам произвольного порядка. Тактирование цифрового регулятора предлагается осуществлять не сигналом таймера, а сигналом тактового датчика длины с мерного колеса, что обеспечивает робастные свойства системы по отношению к изменяющейся скорости изолирования. Настройки цифровых регуляторов по критерию, определяемому исходя из необходимости гарантированного достижения эксплуатационных характеристик изготавливаемого кабеля, определяются на имитационной модели стохастического процесса экструзии и минимизируются путём перемещения регулярного симплекса в пространстве параметров настраиваемого регулятора.

*Ключевые слова:* процесс экструзии, управление, имитационная модель, цифровые регуляторы, оптимизация.

DOI: 10.15372/AUT20170409

**Введение.** Проводные каналы связи создаются с помощью направляющих систем, в качестве которых используются проводные цепи, коаксиальные и симметричные, с парной и четвёрочной скруткой. Основой проводной цепи являются изолированные токопроводящие медные жилы, входящие в состав кабелей той или иной конструкции, в том числе электрических кабелей дальней, зонной, местной связей и стационарных (объектовых) кабелей. Для передачи данных посредством структурированных кабельных систем используются симметричные радиочастотные кабели на основе витой пары [1].

При всём многообразии типов и конструкций выпускаемых проводных кабелей следует выделить их общие свойства, обуславливающие возможность построения общей методологии синтеза алгоритмов и систем автоматического и автоматизированного управления и контроля технологических процессов кабельных производств.

Во-первых, кабель является длинномерным изделием, которое изготавливается «на проход» путём совмещения определённого числа одновременно выполняемых технологических операций с помощью устройств и систем, последовательно расположенных по ходу движения кабельного изделия.

Во-вторых, реальный кабель должен рассматриваться как нерегулярная линия. Так принято называть линии связи с переменными по длине параметрами [1, 2]. Влияние возмущающих воздействий на весь комплекс управляемых локальных систем технологического оборудования обуславливает формирование конструктивных нерегулярностей (неоднородностей) и соответственно нерегулярностей параметров передачи и взаимных влияний кабеля. Причём уровень и характеристики формирующихся стохастических нерегулярностей

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 15-08-04209-а).

определяются как характеристиками технологического оборудования, так и характеристиками законов управления всех локальных систем автоматизации оборудования [2].

Эксплуатируемое в кабельной промышленности технологическое оборудование и типовые аналоговые средства его автоматизации не обеспечивают выполнение всё возрастающих требований к уровню регулярности кабелей связи, что не позволяет, например, выпускать кабели для передачи данных категорий 6 и 7 без модернизации имеющегося оборудования, прежде всего экструзионного. Опыт указывает на возможность достижения существенного эффекта в этом отношении при переходе к цифровым системам управления [2–5].

Целью работы является нахождение математической модели процесса экструзии пористой изоляции, которая позволит получить косвенные оценки качества управляемого процесса изолирования для его автоматизации и оптимизации на основе имитационного моделирования путём эмпирической настройки цифровых регуляторов локальных систем автоматического управления.

**Управление экструзией пористой изоляции.** Операция наложения кабельной изоляции осуществляется на экструзионных линиях, основными элементами которых являются шнековый пластицирующий экструдер, ванны охлаждения и приёмник с тяговым приводом [2, 3, 6].

Наиболее современный тип кабельной изоляции — пористая (пенопластовая — Cellular Polymer (CP)) с химическим или физическим вспениванием. Её использование приводит не только к экономии изолирующего материала (обычно полиэтилена), но и к достижению наилучших электрических свойств кабельной линии [2, 3, 6, 7].

Типовые экструзионные линии, на которых осуществляется наложение на медный проводник пористой изоляции, комплектуются датчиками, измеряющими технологические режимные параметры работы оборудования (температуры зон нагрева цилиндра экструдера, охлаждающей воды, обороты шнека, скорость изолирования и другие). В процессе работы линии непрерывно контролируются важнейшие параметры изолированной жилы: её диаметр  $D_{CP}$  и погонная ёмкость  $C_{CP}$ , которые измеряются «на проход». Это позволяет регистрировать изменяющиеся по длине жилы  $x$  функции  $D_{CP}(x)$  и  $C_{CP}(x)$  [8]. В нормальном режиме работы линии данные функции длины кабеля  $x$  могут рассматриваться как стационарные случайные процессы  $D_{CP}(t)$  и  $C_{CP}(t)$ , где  $x(t) = \int_0^t V_T(t)dt$  или  $x(t) = V_T t$  при постоянной скорости изолирования  $V_T$ , определяемой величиной задающего воздействия привода тяги [3].

Погонная ёмкость представляет собой значение электрической ёмкости между медным проводником и предполагаемым цилиндрическим электродом, охватывающим без зазора внешнюю поверхность изолированной жилы [9, 10]:

$$C_{CP}(x) = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_{CP}(x)}{\ln(D_{CP}(x)/d)}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\varepsilon_{CP}$  — относительная диэлектрическая проницаемость пористой изоляции, зависящая от степени её пористости (и плотности);  $d$  — диаметр медной жилы, который может считаться постоянным с учётом её калибровки через алмазную фильеру перед вводом в экструдер.

При физическом вспенивании регулирование относительной диэлектрической проницаемости пористой изоляции  $\varepsilon_{CP}(x)$  происходит за счёт изменения расхода подаваемого в экструдер газа (азота)  $Q_g(t) = \int_0^t V_g(t)dt$ , что меняет соотношение объёмов газа  $V_g$  и сплошного диэлектрика  $V_{SP} = V_{SP} - V_g$  (SP — Solid Polymer) в экструдированной пористой изоляции [2, 7].

В [11] приводится формула Вагнера, связывающая степень пористости (отношение объёма газовых включений к общему объёму пористого полимера) с относительной диэлектрической проницаемостью изоляции для матричной смеси со сферическими включениями, что применимо для нашего случая:

$$\frac{\varepsilon_{\text{CP}} - \varepsilon_{\text{SP}}}{\varepsilon_{\text{CP}} + 2\varepsilon_{\text{SP}}} = \frac{V_{\text{g}}}{V_{\text{CP}}} \frac{\varepsilon_{\text{g}} - \varepsilon_{\text{SP}}}{\varepsilon_{\text{g}} + 2\varepsilon_{\text{SP}}}. \quad (2)$$

Здесь  $\varepsilon_{\text{SP}}$  — относительная диэлектрическая проницаемость сплошного полимера;  $\varepsilon_{\text{g}}$  — относительная диэлектрическая проницаемость газа (азота);  $V_{\text{CP}}$  — объём пористой изоляции.

Отсюда следует, что для поддержания заданного номинального значения относительной диэлектрической проницаемости экструдированной пористой изоляции при случайных флуктуациях диаметра изоляции  $D_{\text{CP}}$  необходимо вести непрерывную оценку скользящего среднего диаметра пористой изоляции  $\bar{D}_{\text{CP}}(t) = 1/T \int_{t-T}^t D_{\text{CP}}(t) dt$  и корректировать скорость подачи газа в соответствии с задающим воздействием регулятора скорости подачи газа:

$$\dot{Q}_{\text{g}}(t) = k_{\text{e}}[\bar{D}_{\text{CP}}^2(t) - d^2] \quad (3)$$

( $k_{\text{e}}$  — коэффициент пропорциональности).

Величина интервала времени  $T$ , на котором вычисляется скользящее среднее  $\bar{D}_{\text{CP}}^2$ , должна превышать величину интервала корреляции случайного процесса  $D_{\text{CP}}(t)$ . Для этого при цифровой обработке дискретного сигнала датчика усредняются последние  $N$  отсчётов значения диаметра  $D_{\text{CP}}(k)$  по известному рекуррентному алгоритму. Алгоритм усреднения временных отсчётов  $X(k)$  с конечной памятью  $N$  (алгоритм скользящего среднего) имеет вид [12]

$$\bar{Y}(k) = \bar{Y}(k-1) + \frac{1}{N} [X(k) - X(k-N)]. \quad (4)$$

Величина коэффициента  $k_{\text{e}}$ , входящего в (3), определяется заданным номинальным значением относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{CPn}}$  экструдированной пористой изоляции и может быть рассчитана по выражению

$$k_{\text{e}} = \frac{\pi (1 + 2\varepsilon_{\text{SP}})(\varepsilon_{\text{CPn}} - \varepsilon_{\text{SP}})}{4 (1 - \varepsilon_{\text{SP}})(\varepsilon_{\text{CPn}} + 2\varepsilon_{\text{SP}})}. \quad (5)$$

При реализации комплекса систем автоматического управления процессом экструзии пористой изоляции выражение (3) с учётом (5) должно рассматриваться как косвенная оценка задающего воздействия управляющего регулятора скорости подачи газа (азота)  $\dot{Q}_{\text{g}}(t)$ , которое обеспечит требуемое среднее значение относительной диэлектрической проницаемости экструдированной пористой изоляции  $\varepsilon_{\text{CPn}}$  даже при вариациях экструдированного потока расплава сплошного полимера.

Наивысшая регулярность производимых кабелей связи достигается при автоматической стабилизации не только технологических режимных параметров экструзионной линии, но и при обязательном непрерывном измерении «на проход» и стабилизации параметров экструдированной пористой изоляции, обычно  $D_{\text{CP}}$  и  $C_{\text{CP}}$  [1]. Однако, как следует из (1), такое управление является связанным через объект управления. Лучшее решение — построение системы автоматического регулирования диаметра изоляции и её степени пори-

стости, определяемой по вычисляемой косвенной оценке относительной диэлектрической проницаемости пористой изоляции, как правило, линеаризованной [2, 3]:

$$\varepsilon_{\text{CP}}(t) = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} C_{\text{CP}}(t) \ln \frac{D_{\text{CP}}(t)}{d} \approx \varepsilon_{\text{CPn}} + K_C \Delta C_{\text{CP}}(t) + K_D \Delta D_{\text{CP}}(t), \quad (6)$$

где  $K_C$  и  $K_D$  — чувствительности  $\varepsilon_{\text{CP}}$  к погонной ёмкости и диаметру изоляции.

**Контроль и управление по обобщённым параметрам.** Учитывая, что конечной целью автоматизации технологического процесса экструзии является выпуск кабельной продукции с наилучшими (предельно достижимыми) эксплуатационными характеристиками, глобальная оптимизация автоматизированной системы управления технологическим процессом экструзии достигается при непрерывном контроле вклада нерегулярности экструдируемой изоляции в обобщённый параметр качества кабеля конкретного типа (эксплуатационный параметр) [1, 2]. А так как и контроль, и управление в современном оборудовании реализуются на основе цифровой техники, то алгоритмизация измерения, контроля и управления ведётся с дискретизацией по времени  $t$  и длине кабеля  $x$ .

Согласно условиям теоремы Котельникова и значению верхней частоты передаваемого по кабелю сигнала  $f_{\text{max}}$  интервалы квантования по времени  $T_0$  и по длине кабеля  $L_0$  не должны превышать следующих значений [2]:

$$L_0 = v/(4f_{\text{max}}), \quad (7)$$

$$T_0 = L_0/V_T = v/(4f_{\text{max}}V_T), \quad (8)$$

где  $v$  — скорость распространения электрического сигнала по кабелю, зависящая от диэлектрической проницаемости среды направляющей системы [1].

При анализе характеристик изготовленного кабеля следует учитывать, что характеристики передачи и взаимных влияний кабеля на частоте  $f$  определяются нерегулярностями с пространственной частотой [2]

$$g = 1/L = 2f/v, \quad (9)$$

где  $L$  — длина периода пространственной нерегулярности.

Поэтому значение верхней частоты сигнала  $f_{\text{max}}$  определяет верхнюю пространственную частоту  $g_{\text{max}}$  корреляционно-спектрального анализа пространственных нерегулярностей, на основе которого может быть построена имитационная модель стохастического процесса формирования эксплуатационного показателя качества кабеля связи.

В качестве обобщённого показателя качества  $P$  для коаксиального кабеля обоснован выбор его волнового сопротивления  $Z$ , изменяющегося по длине кабеля  $x$ , а у симметричного кабеля для передачи данных — рабочей ёмкости, изменяющейся по длине кабеля  $x$  и зависящей от прямо и косвенно измеряемых параметров  $P_i(x)$ . С учётом малости вариаций стабилизируемых параметров указанные зависимости адекватно линеаризуются путём расчёта чувствительности обобщённого показателя к каждому  $i$ -му измеряемому параметру  $P_i$ .

Легко определяется зависимость волнового сопротивления коаксиального кабеля от параметров изолируемой жилы [2]. Более сложно описывается зависимость рабочей ёмкости витой пары кабеля для передачи данных. Соответствующая зависимость и чувствительность обобщённого параметра к диаметру, погонной ёмкости и относительной диэлектрической проницаемости пористой изоляции определены в явном виде с помощью конформного преобразования на основе дробно-линейной функции [13].

Использование вышеописанной линеаризации и необходимость сглаживания (низкочастотной фильтрации) контролируемых параметров  $P_i$  для приведения к общей разрешающей способности измерений (фактически к разрешающей способности самого инерционного датчика — погонной ёмкости) обуславливают следующий цифровой алгоритм косвенной оценки вклада изолируемой жилы в обобщённый показатель качества изготавливаемого кабеля:

$$P(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r K_i b_j \bar{P}_i(k - j - d_i), \quad (10)$$

где  $n$  — число параметров жилы, измеряемых «на проход»;  $r$  — длина сглаживающих цифровых фильтров;  $K_i$  — чувствительность обобщённого показателя качества кабеля к  $i$ -му управляющему параметру;  $b_j$  — весовые коэффициенты фильтров;  $\bar{P}_i$  — центрированное и усреднённое значение  $i$ -го параметра;  $d_i$  — расстояние, выраженное в тактовых интервалах датчика длины (мерного колеса), от датчика  $i$ -го параметра до места установки на экструзионной линии тактового датчика длины, т. е. к одному сечению кабеля, к которому приводятся все измерения.

Весовые коэффициенты  $b_j$  в (10) рассчитываются путём частотной идентификации для компенсации различия амплитудно-частотных характеристик датчиков [2].

**Синтез и оптимизация цифровых регуляторов.** Цифровые регуляторы делятся на две основные группы: параметрически и структурно оптимизируемые.

У параметрически оптимизируемых регуляторов структура выбирается из общих соображений, например отсутствия статической ошибки системы. Использование параметрически оптимизируемых ПИД-регуляторов, настроенных по типовым критериям, приводит к ухудшению эксплуатационных характеристик изготавливаемого высокочастотного кабеля. Даже незначительная колебательность возмущённого процесса системы стабилизации параметра кабеля приводит к появлению узкополосной нерегулярности кабеля и к практическому «запираанию» кабеля на соответствующей резонансной частоте передаваемого сигнала [14, 15].

С помощью структурно оптимизируемого регулятора может быть построен терминальный цифровой регулятор, обеспечивающий при изготовлении кабеля форму возмущённого процесса типа «плавный переход», дающий минимальные отражения передаваемого по кабелю сигнала [1, 12, 16].

Учитывая накопленный опыт проектирования цифровых регуляторов, можно рекомендовать более универсальный обобщённый линейный алгоритм управления, параметры которого могут быть настроены оптимально на имитационной модели системы перемещением регулярного симплекса в пространстве настроек регулятора, имеющего дискретную передаточную функцию [12, 17]

$$G_{\text{cont}}(z) = \frac{Q(z)}{U(z)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + \dots + q_i z^{-i}}{1 - z^{-1}}, \quad (11)$$

где  $z$  — переменная  $Z$ -преобразования дискретных сигналов [12];  $q_i$ ,  $i = 0, \dots, n$ , — настройки цифрового регулятора, конкретные значения которых рассматриваются как точки в пространстве настроек регулятора.

Для оптимизации настроек регулятора выбирается желаемый критерий оптимальности, например простейший:

$$J = \sum_{k=1}^M e^2(k) \rightarrow \min, \quad (12)$$

где  $e(k)$  —  $k$ -й отсчёт ошибки — отклонения регулируемого параметра от номинальной величины в цифровой системе стабилизации параметра изоляции;  $M$  — число тактов переходного процесса системы.

Учитывая накопленный опыт проектирования цифровых регуляторов, можно рекомендовать оптимальную настройку обобщённого цифрового линейного регулятора по критерию минимума дисперсии ошибки либо по критерию минимума дисперсии производной ошибки в пространстве  $R^n$  при  $n = 3$ , когда регулярный симплекс имеет вид тетраэдра, а координаты вершин симплекса задаются с помощью матрицы размера  $n \times (n + 1)$  [18]. Вершина с минимальным значением критерия оптимальности (отклика)  $J_k$  и определяет оптимальные настройки цифрового регулятора.

Если цифровой регулятор (11) синхронизировать не тактовым сигналом с таймера, а сигналом тактового датчика длины (мерного колеса), поступающим через расстояния  $L_0$  по длине кабеля, система приобретает робастные свойства к переменной скорости изолирования  $V_T(t)$  [2].

Описанная процедура была применена для имитационного моделирования и управления изолированием провода ТПппП-0,5-0,84 на экструзионной линии TEL-35.

Полученные на основе экспериментально снятых в реальных производственных условиях данных оценки корреляционных функций диаметра  $R_D(\tau)$  и ёмкости  $R_C(\tau)$  изоляции аппроксимированы нормированными выражениями:

$$R_C(\tau) = 640 \cdot e^{-0,012|\tau|} \cdot \cos 0,025\tau, \quad (13)$$

$$R_D(\tau) = 558 \cdot e^{-0,013|\tau|} \cdot \cos 0,030\tau. \quad (14)$$

Длительность обработанных реализаций  $C_{CP}(t)$  и  $D_{CP}(t)$  при этом составляла 1800 секунд. При расчёте оценок корреляционных функций исходные реализации были нормированы умножением на нормирующие множители  $1,065 \text{ пФ}^{-1} \cdot \text{м}$  для погонной ёмкости и  $962,9 \text{ мм}^{-1}$  для диаметра изоляции.

Расхождение экспериментальных оценок корреляционных функций, рассчитанных по исходным данным, и аппроксимирующих их аналитических (конечномерных параметрических) моделей не превысило 5 %.

При имитационном моделировании получены аналитические выражения для спектральных плотностей процессов, соответствующих (13) и (14), и методом их факторизации (расщепления) определены параметрические модели случайных процессов  $C_{CP}(t)$  и  $D_{CP}(t)$  в виде передаточных функций формирующих фильтров:

$$W_{FC}(p) = \frac{2,412p + 0,069}{p^2 + 0,020p + 0,829 \cdot 10^{-3}}, \quad (15)$$

$$W_{FD}(p) = \frac{3,040 + 0,010}{p^2 + 0,031p + 1,147 \cdot 10^{-4}}. \quad (16)$$

Переход к дискретным фильтрам с передаточными функциями  $G_{FC}(z)$  и  $G_{FD}(z)$  из непрерывных вида (15) и (16) осуществляется простой подстановкой [18]:  $p = \frac{2}{T_0} \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$ .

При описании экструдера как объекта управления (ОУ), когда выходное воздействие — измеряемый после ванны охлаждения диаметр изоляции, а входное — задающее

воздействие привода шнека, получена следующая непрерывная передаточная функция [19]:

$$W_{PD}(p) = \frac{K_{PD}}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} e^{-\tau_D p}, \quad (17)$$

где  $K_{PD}$  — коэффициент передачи ОУ;  $T_1$  — постоянная времени привода шнека экструдера;  $T_2$  — постоянная времени экструдера;  $\tau_D$  — транспортное запаздывание. Для рассматриваемого ОУ  $T_1 = 0,3$  с,  $T_2 = 0,5$  с,  $\tau_D = 0,5$  с; коэффициент усиления объекта для упрощения расчётов включён в коэффициент усиления регулятора, поэтому  $K_{PD} = 1$  [19].

В [20] при синтезе цифровой системы управления предлагается сначала обеспечить минимальный порядок модели ОУ, т. е. осуществить редукцию модели — упрощённое представление ОУ. Для этого рекомендуется использовать обобщённую модель в виде апериодического звена, постоянная времени которого равна сумме постоянных времён всех апериодических компонент передаточной функции и называется «обобщённой суммой постоянных времени» объекта управления:  $T_{\Sigma D} = T_1 + T_2 = 0,3 + 0,5 = 0,8$  [с]. Тогда

$$W_{PD}(p) = \frac{1}{T_{\Sigma D} p + 1} e^{-\tau_D p}. \quad (18)$$

Передаточная функция ОУ контура стабилизации погонной ёмкости изолированной жилы аналогична (18):

$$W_{PC}(p) = \frac{1}{T_{\Sigma C} p + 1} e^{-\tau_C p}. \quad (19)$$

Параметры объекта управления контура погонной ёмкости:  $T_{\Sigma C} = 2$  с,  $\tau_C = 0,5$  с [19].

Эквивалентная (19) дискретная передаточная функция ОУ имеет вид [20]

$$G_{PC}(z) = \frac{b_1 z^{-1}}{1 + a_1 z^{-1}} z^{-d}. \quad (20)$$

Здесь

$$b_1 = K_{PC}(T_0/T_{\Sigma C}); \quad a_1 = -e^{-T_0/T_{\Sigma C}}; \quad d = \tau_C/T_0. \quad (21)$$

В [20] отмечается, что интервал квантования по времени дискретной системы  $T_0$  должен удовлетворять формулам

$$T_0 \ll T_{\Sigma C}; \quad T_0 \ll \tau_C. \quad (22)$$

С другой стороны, интервалы квантования по времени  $T_0$  и по длине кабеля  $L_0$  не должны превышать значений (7) и (8).

При  $f_{\max} = 500$  МГц,  $V_T = 25$  м/мин и с учётом скорости распространения электрического сигнала по кабелю  $v = 3 \cdot 10^8$  м/с получаем  $L_0 = 0,15$  м;  $T_0 = 0,36$  с. В соответствии с (22) выбираем  $T_0 = 0,1$  с. Тогда согласно (21) имеем  $b_1 = 0,05$ ,  $a_1 = -0,95$ ,  $d = 5$ , откуда эквивалентная дискретная передаточная функция ОУ имеет вид

$$G_{PC}(z) = \frac{0,05 z^{-1}}{1 - 0,95 z^{-1}} z^{-5}. \quad (23)$$

Математические модели (13)–(16), (23) позволили построить имитационную модель стохастического процесса формирования диаметра и погонной ёмкости для дальнейшей эмпирической настройки цифровых регуляторов локальных САУ экструзионной линии.

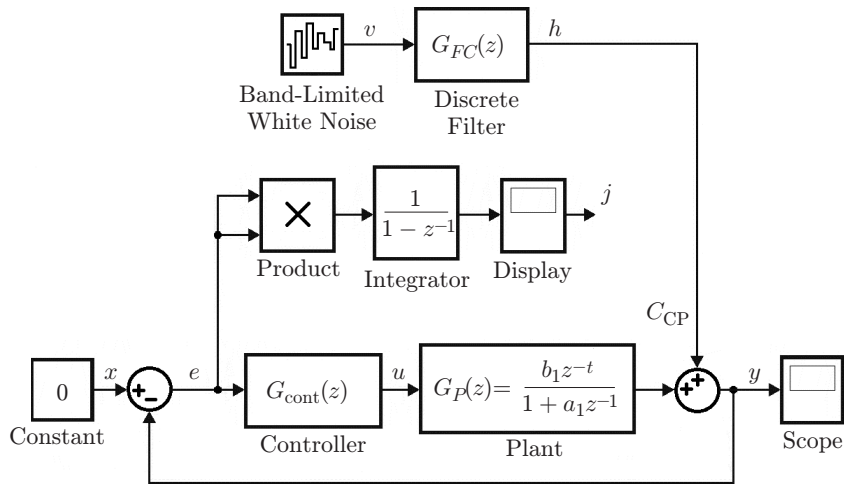


Рис. 1. Имитационная модель цифровой управляемой системы формирования погонной ёмкости изолированной кабельной жилы в MATLAB

Необходимо отметить, что аналитическая оптимизация параметров цифровых регуляторов полученного порядка невозможна [20].

При настройке по критерию минимальной дисперсии ошибки САУ ёмкостью  $C_{CP}$  для цифрового регулятора второго порядка с помощью трёхмерного симплекса определены оптимальные настройки, которые соответствуют дискретной передаточной функции цифрового регулятора:

$$G_{\text{cont}}(z) = \frac{33,86 + 12,14z^{-1} + 18,69z^{-2}}{1 - z^{-1}}. \quad (24)$$

Моделирование на имитационной модели системы (рис. 1) показало девятикратное уменьшение дисперсии ошибки системы с данным регулятором по сравнению с непре-

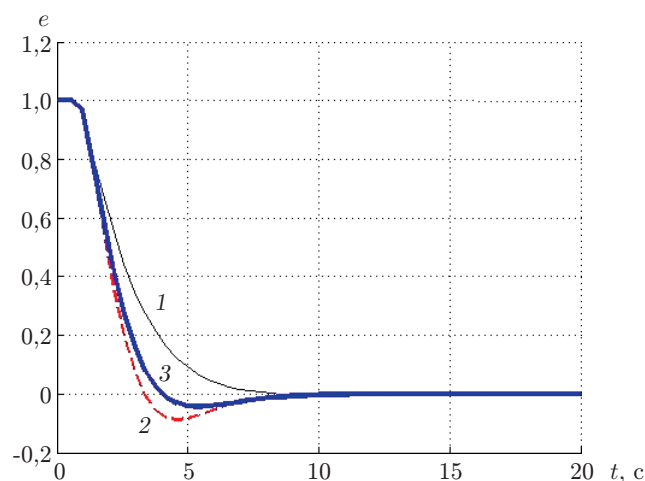


Рис. 2. Сравнение графиков изменения ошибки регулирования: кривая 1 — при использовании ПИ-регулятора (настройка по критерию максимального быстрого действия), 2 — при использовании обобщённого цифрового регулятора (настройка по критерию минимума дисперсии ошибки), 3 — при использовании обобщённого цифрового регулятора (настройка по критерию минимума дисперсии производной ошибки)



рывным ПИ-регулятором, настроенным по традиционным методикам. Под традиционной методикой настройки ПИ-регулятора понимается настройка САУ по быстродействию, не учитывающая конкретные корреляционно-спектральные характеристики возмущающего воздействия и не гарантирующая минимума дисперсии ошибки. Предлагаемый подход с использованием линейного обобщенного цифрового регулятора  $n$ -го порядка при увеличении порядка выше третьего обеспечивает достижение настолько малой величины критерия оптимальности, насколько это технически необходимо в отличие от ПИД-регулятора.

Стандартные динамические характеристики системы автоматического управления, использующей ПИ-регулятор и обобщенный цифровой регулятор, показаны на рис. 2.

**Заключение.** В данной работе рассмотрена методология построения автоматизированных систем контроля и управления процессом экструзии пористой изоляции разных типов кабелей, учитывающая связь измеряемых и управляемых параметров изоляции с эксплуатационными характеристиками производимой кабельной продукции. Преимущество представленного подхода заключается в том, что описанные методы позволяют существенно поднять качество кабельной продукции за счёт структурно-параметрической оптимизации предлагаемых цифровых регуляторов без использования более дорогих исходных материалов и модернизации экструзионного оборудования.

Представленные рекомендации также могут быть реализованы как при проектировании новых кабельных производств, так и при их модернизации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гроднев И. И., Шварцман В. О.** Теория направляющих систем связи. М.: Связь, 1978. 296 с.
2. **Чостковский Б. К.** Методы и системы оптимального управления технологическими процессами производства кабелей связи. М.: Машиностроение-1, 2009. 189 с.
3. **Митрошин В. Н.** Автоматизация технологических процессов производства кабелей связи. М.: Машиностроение-1, 2006. 140 с.
4. **Eker A., Giamattia M., Hout P. et al.** Intelligent Extruder for Polymer Compounding. Final Technical Report. SciTech Connect. USA, 2003. 107 p. URL: <https://www.science.gov/topicpages/t/thermoplastic+extruder+implements.html> (дата обращения: 13.04.2017).
5. **Screw Extrusion** // Advances in Polymer Processing /Eds. J. W. Sikora, T. Sabu, W. Yang. Oxford — Cambridge — New Delhi, UK: Woodhead Publishing Limited. 2009. P. 106–142.
6. **Рауендаль К.** Экструзия полимеров: Пер. с англ. С.-Пб.: Профессия, 2008. 768 с.
7. **Бонвин П.-И., Родригез Р., Чамов А. В.** Линии изолирования коаксиальных кабелей с процессом физического вспенивания Extrucell™ // Кабель-News. 2004. № 5. С. 13–18.
8. **Шенкель Г.** Шнековые прессы для пластмасс. М.: Госхимиздат, 1962. 467 с.
9. **Ефимов И. Е., Останкович Г. А.** Радиочастотные линии передачи. Радиочастотные кабели. М.: Связь, 1977. 408 с.
10. **А. с. 737843 СССР.** Устройство для измерения электрической емкости кабельных жил и проводов /А. А. Абросимов, О. Ф. Брюханов, А. В. Зубков и др. 1980. БИ № 20.
11. **Сажин Б. И.** Электрические свойства полимеров. М.: Химия, 1970. 376 с.
12. **Чостковский Б. К.** Моделирование и алгоритмизация процессов управления в стохастических системах с цифровыми регуляторами. Самара: СамГТУ, 2013. 134 с.
13. **Чостковский Б. К., Смородинов Д. А.** Математическая модель витой пары радиочастотного кабеля объекта управления // Вестн. СамГТУ. Сер. Физико-математические науки. 2008. 16, № 1. С. 113–118.

14. **Дорезюк Н. И., Попов М. Ф.** Радиочастотные кабели высокой регулярности. М.: Связь, 1979. 104 с.
15. **Дорезюк Н. И.** Гармонический анализ периодических неоднородностей волнового сопротивления коаксиальных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. 1974. № 6. С. 18–22.
16. **Чостковский Б. К.** Алгоритмизация терминального управления совмещенным технологическим процессом изготовления радиочастотных кабелей // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2002. Вып. 14. С. 33–37.
17. **Чостковский Б. К., Денисов В. Ю., Дьяконов А. И.** Оптимизация многосвязного регулирования симплексным методом // Вестн. СамГТУ. Сер. Технические науки. 2013. 40, № 4. С. 59–66.
18. **Чостковский Б. К., Ландфанг М. А.** Цифровые системы управления: лабораторный практикум. Самара: СамГТУ, 2015. 134 с.
19. **Чостковский Б. К.** Синтез и оптимизация управляемых стохастических систем. Самара: СамГТУ, 2013. 156 с.
20. **Изерман Р.** Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.

*Поступила в редакцию 13 апреля 2017 г.*

---