

## МНОГОПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВОМ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРУЮЩИХ МОДЕЛЕЙ

**В.Н. Митрошин**

Самарский государственный технический университет  
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Предлагается методология автоматизации производства проводных кабелей связи с использованием усовершенствованного управления технологическими процессами (АРС-систем) на основе прогнозирующих моделей для обеспечения требуемого качества кабеля как канала связи с учетом его полосы пропускания.*

**Ключевые слова:** *многопараметрическое управление, прогнозирующие модели, автоматизация, производство кабелей.*

Коаксиальные и LAN-кабели являются основными каналами связи большинства современных технических систем. Процессы изготовления проводных кабелей связи (КС), в полной мере обладающие признаками сложных систем, являются непрерывными, многооперационными технологическими процессами.

При этом качество изготавливаемого кабеля как канала связи определяется неким глобальным критерием (обобщенным параметром) качества [1], характеризующим потребительские свойства продукции, в роли которого чаще всего выступает однородность волнового сопротивления кабеля по его длине [2], и может быть измерено лишь на готовом кабеле.

Формирование обобщенного параметра качества кабеля осуществляется на всех технологических операциях его производства. Изготовление кабелей связи подвержено влиянию случайных возмущающих воздействий, а потому контролируемые «на проход» параметры кабельного изделия (локальные параметры качества) имеют непостоянные по длине кабеля значения и являются случайными функциями координаты длины кабеля  $x$  – т. е. нерегулярными. Большинство технологических режимных параметров работы оборудования вследствие случайных возмущений нестационарны во времени.

Поэтому необходимыми условиями получения качественной продукции являются автоматизация всех промежуточных технологических операций ее производства для минимизации нерегулярностей локальных параметров качества кабеля и стабилизация режимных параметров работы оборудования на основе требований к предельным величинам нерегулярностей первичных параметров кабеля и стабильности технологических режимных параметров работы оборудования, сформулированных исходя из необходимости обеспечения требуемого качества изготавливаемого кабеля.

Важнейшей операцией изготовления КС, во многом определяющей качество кабеля как канала связи, является операция изолирования – наложения изоляции на токопроводящую жилу, осуществляемая на экструзионных линиях.

«Оптимизация» всех локальных систем автоматической стабилизации должна основываться на использовании математической модели, отражающей взаимосвязь обобщенного параметра, характеризующего качество нерегулярного кабеля, с

---

*Владимир Николаевич Митрошин (д.т.н., доц.), заведующий кафедрой «Автоматика и управление в технических системах».*

управляемыми параметрами (локальными параметрами качества) кабеля и технологическими режимными параметрами, являющимися воздействиями объекта управления [3].

Технологический процесс производства КС в принципе нереализуем без использования систем автоматического регулирования основных технологических параметров оборудования и параметров качества изготавливаемого кабеля [4]. Но до настоящего времени подавляющее большинство автоматических систем в кабельном производстве строятся как локальные системы регулирования – системы стабилизации первичных параметров кабеля (диаметра и погонной емкости изолированной жилы), режимных параметров работы технологического оборудования (температур зон нагрева цилиндра экструдера, температуры воды в охлаждающих ваннах, оборотов шнека, скорости изолирования и т. д.).

Как правило, традиционные подходы к моделированию технологических процессов кабельного производства основаны на упрощенных описаниях, базирующихся на гипотезах о стационарности, линейности и гауссовом характере изучаемых процессов. Для большинства реальных задач данные предположения являются некорректными. Динамические системы кабельного производства многомерны, нестационарны и описываются сложными, порою скачкообразными нелинейными процессами. Кроме того, некоторые объекты (экструдеры, охлаждающие ванны) являются классическими объектами с распределенными параметрами. В результате указанного противоречия классические схемы моделирования не отвечают физике автоматизируемых процессов и потому приводят к малодостоверным оценкам, не удовлетворяющим потребностям систем управления.

Широко применяемая в кабельной промышленности практика измерения качественных параметров изготавливаемой продукции на «готовом» кабеле (в конце охлаждающих ванн) приводит к появлению в структуре систем автоматического регулирования (стабилизации) параметров звеньев с большим транспортным запаздыванием (порядка десятков секунд).

В связи с этим возникает проблема создания математического и программного инструментария, обеспечивающего возможность эффективного моделирования эволюции сложных динамических систем и его приложения к задачам прогнозирования состояния и качественных характеристик изготавливаемой продукции.

В основу целеполагания построения систем автоматического управления производством КС должно быть положено обеспечение требуемого эксплуатационного показателя изготавливаемого кабеля как канала связи с учетом полосы частот пропускаемого сигнала на основе применения системного подхода к автоматизируемому технологическому процессу [5]. Существующие в настоящее время подходы к автоматизации процессов производства КС и используемые технические решения имеют ряд недостатков.

Во-первых, повышение требований к проводным КС как каналам передачи информации накладывает новые жесткие ограничения на их эксплуатационные параметры качества и, соответственно, ужесточает требования к статическим и динамическим характеристикам систем управления технологическими процессами изготовления КС. В настоящее время верхняя частота полосы пропускания проводных КС достигает 1 ГГц.

Известно, что максимальная частота передаваемого по кабелю электрического сигнала (верхняя частота рабочего диапазона кабеля)  $f_b$  определяет максимальную частоту взаимодействующих с ним пространственных неоднородностей  $g_{\max}$  первичных параметров кабеля следующим образом [6]:

$$g_{\max} = \frac{2f_B}{V_e}, \quad (1)$$

где  $V_e$  – скорость распространения электромагнитной волны по кабелю. Для коаксиальной пары она равна [7]

$$V_e = c/\sqrt{\varepsilon_r} \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$\varepsilon_r$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Соответственно, минимальный пространственный период неоднородностей, которые должны быть устранены системой регулирования, равен

$$L_{k \min} = \frac{1}{g_{\max}}. \quad (3)$$

Для современных кабелей с верхней границей полосы пропускания 600 МГц .  
 $L_{k \min} = 0,165$  м.

На существующих экструзионных линиях контроль первичных параметров качества изоляции осуществляется обычно на сформировавшейся изоляции, т. е. на выходе ванн охлаждения, длина которых составляет более 10 м. При этом в системах регулирования по ошибке контролируемого параметра величина транспортного запаздывания  $\tau$  определяется по формуле

$$\tau = \frac{L_B}{V}, \quad (4)$$

где  $L_B$  – длина ванны охлаждения до места установки датчиков;

$V$  – скорость изготовления кабеля (изолирования).

Так как в процессе производства производительность линии (скорость изолирования) может изменяться, то транспортное запаздывание является переменной величиной.

Но, как известно [8], время регулирования систем с транспортным запаздыванием при использовании ПИД-регуляторов можно получить порядка  $(4 \div 6)\tau$ , что соответствует пространственным неоднородностям  $(4 \div 6)L_B$ . Следовательно, неоднородности контролируемых параметров с пространственным периодом менее четырехкратного расстояния от головки пресса до контролирующих датчиков не могут быть скорректированы системой управления.

$$L_{k \min} \geq 4L_B = 4V\tau \quad (5)$$

Тогда с учетом (1) ÷ (5) может быть сформулировано требование к величине максимального транспортного запаздывания в системе управления процессом изолирования:

$$\tau \leq \frac{V_e}{8f_B V}. \quad (6)$$

Для рассматриваемого изготавливаемого кабеля и технологической линии ME-90 фирмы Maillefer со скоростью изолирования  $V = 30$  м/мин величина предельного транспортного запаздывания в соответствии с (6) не должна превышать 0,08 с, что абсолютно нереально (на рассматриваемой линии величина транспортного запаздывания составляет порядка 30 с).

Отсюда очевидно, что использование стандартных систем регулирования (ста-

билизации) формируемых на операции изолирования первичных параметров качества кабеля – диаметра и погонной емкости изоляции – по их отклонению от номинальных значений не только неприемлемо, а даже вредно для КС, рассчитанных на передачу сигналов с высокой верхней частотой полосы пропускания [9].

Для управления процессом изолирования необходимо располагать датчики контролируемых параметров либо в самом экструдере, либо в непосредственной близости от него. Например, для контроля количества выдавливаемого прессом полимера с помощью измерения диаметра изолированной жилы лазерный датчик диаметра нужно располагать непосредственно на выходе кабельной головки. При этом на основе использования уравнения сохранения массы, если известен номинальный диаметр изолированной жилы  $D_{из1}$  при температуре окружающей среды (например 20 °С), можно легко получить формулу для установки датчика диаметра  $D_{из0}$  в месте его установки на выходе кабельной головки:

$$D_{из0} = \sqrt{D_{из1}^2 \cdot \frac{\rho_1}{\rho_0} + d^2 \cdot \frac{(\rho_0 - \rho_1)}{\rho_0}}, \quad (7)$$

где  $d$  – диаметр медного проводника;

$\rho_0$  – плотность полимера при температуре его выхода из кабельной головки;

$\rho_1$  – плотность полимера при температуре окружающей среды.

Зависимость плотности полиэтилена высокого давления низкой плотности (ПЭНП) марки 153-01, обычно применяемого для изолирования кабелей связи, от температуры приведена на рис. 1 [10].

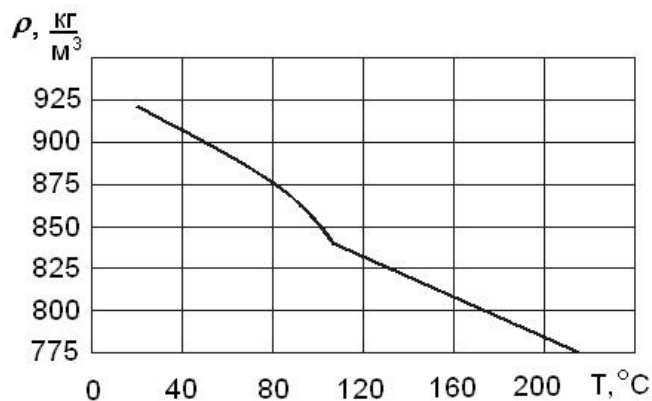


Рис. 1. Зависимость плотности полиэтилена марки 153-01 от температуры

Формула (7) получена без учета температурного расширения медного проводника. Она может быть использована для косвенных оценок (расчета) диаметра изолированной жилы при любой температуре полимера, измеряемой датчиком температуры.

Во-вторых, необходимо по возможности осуществлять динамическую компенсацию возмущающих воздействий. Так, в работах [11, 12] показано, что высокочастотные периодические неоднородности диаметра накладываемой кабельной изоляции обусловлены периодическими пульсациями давления расплава в кабельной головке, вызываемыми вращающимся шнеком экструдера.

Предложенная в [12] методика определения характеристик гармонических возмущающих воздействий в системе стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера и описанная в [13] система динамической компенсации данного возмущающего воздействия позволили уменьшить амплитуду пульсаций давления на выходе системы стабилизации практически в пять раз. Это в свою очередь привело к существенному уменьшению гармонических изменений мгновенной объемной производительности экструдера и, соответственно, к значительному уменьшению периодических неоднородностей диаметра изоляции кабельной заготовки.

Динамическая компенсация возмущающих воздействий в виде управления по прямой связи может заблаговременно компенсировать сильные измеряемые помехи. При этом передаточная функция  $z(p)$ , учитывающая действие возмущающего воздействия на объект, может быть найдена экспериментально в режиме ручного управления процессом (см. рис. 1). Затем на основании нее можно вывести передаточную функцию  $c(p)$  для управляющего элемента, компенсирующего возмущающее воздействие.

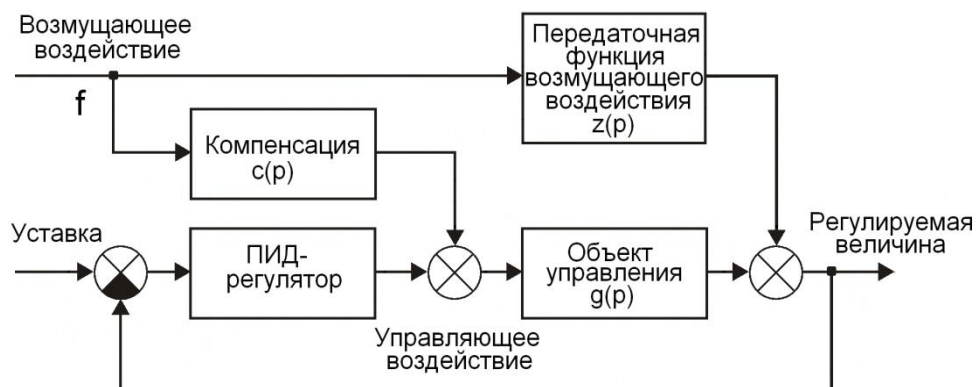


Рис. 2. Динамическая компенсация возмущающих воздействий

Концепции регулирования, основанные на использовании ПИД-регуляторов в локальных системах стабилизации параметров качества в сложных, многосвязных, нестационарных процессах, наталкиваются на ряд ограничений, в том числе и рассмотренных выше.

Значительно больше возможностей появляется у разработчиков с использованием получивших достаточно широкое распространение систем усовершенствованного управления процессами (Advanced Process Control, APC-систем), в которых математически описываются даже сложные взаимосвязи параметров процесса. APC-системы реализуют в реальном масштабе времени на базе многомерного управления технологическим процессом на основе прогнозирующей модели этого процесса стратегию оптимального управления технологической установкой при минимальном вмешательстве оператора.

Правда, в настоящее время подобные системы применяются в основном в нефтедобывающей, химической, нефтехимической промышленности, энергетике, фармацевтике [14].

Перед системой усовершенствованного управления технологическим процессом стоят, по сути, две задачи: за короткое время вычислить оптимальный режим для

технологического процесса и удерживать технологический процесс в рамках этого режима, оперативно предупреждая и устраняя отклонения от него.

Широкое внедрение на промышленных предприятиях систем усовершенствованного управления технологическим процессом стало возможным благодаря использованию современных средств промышленной автоматизации и доступности персональных компьютеров. Компьютеры позволили практически мгновенно производить огромные объемы вычислений, необходимых для построения модели технологического процесса, прогнозирования его хода и оперативного реагирования на малейшие отклонения от оптимального режима.

Кроме того, системы усовершенствованного управления технологическими процессами наряду с многочисленными основными функциями регулирования могут предоставить пользователю дополнительные возможности, такие как динамическая компенсация возмущающих воздействий, оптимизация настроек PID-регуляторов, контроль качества регулирования, реализация упределителей Смита, прогнозирующее многосвязное регулирование на основе модели и т. д. При этом использование систем усовершенствованного управления технологическими процессами позволяет:

- радикально уменьшить нежелательные колебания параметров процесса;
- заметно сократить расход сырья и потребление энергии;
- повысить производительность и качество продукции;
- уменьшить нагрузки на управляющий персонал.

Очевидно, что для управления технологическими процессами изготовления КС использование АРС-систем является самым перспективным направлением.

Примером применения задачи многосвязного управления с прогнозом, которая может быть эффективно решена средствами АРС, является управление давлением и температурой в зоне дозирования одночервячного экструдера для оптимизации массового выхода расплава полимера с целью стабилизации формируемого диаметра изоляции и, соответственно, минимизации нерегулярностей волнового сопротивления изготавливаемого кабеля.

Известно выражение для волнового сопротивления  $Z$  коаксиального кабеля [7]

$$Z = 60 \sqrt{\ln \frac{D}{D_{из}} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\epsilon_{из}} \cdot \ln \frac{D_{из}}{d} \cdot \ln \frac{D}{d}}. \quad (8)$$

Здесь  $D$  – внутренний диаметр внешнего проводника;

$\epsilon_{из}$  – относительная диэлектрическая проницаемость изоляции.

Для LAN-кабелей 7-й категории (на базе экранированной витой пары) выражение для волнового сопротивления имеет вид [15]

$$Z = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{эКВ}}} \cdot \ln \frac{D_{из1} + D_{из2} - d}{d} \cdot \frac{4d_э^2 - (D_{из1} + D_{из2})^2}{4d_э^2 + (D_{из1} + D_{из2})^2}, \quad (9)$$

где  $D_{из1}$  и  $D_{из2}$  – диаметры по изоляции проводов пары;

$d_э$  – диаметр экрана;

$\epsilon_{эКВ}$  – эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость скрученной пары.

Выражения (8) и (9) позволяют формулировать требования к параметрам кабельных заготовок на промежуточных технологических операциях производства кабелей связи, например на операции изолирования.

С учетом коэффициентов чувствительности  $K_j$  волнового сопротивления к тех-

нологическим параметрам качества  $\Pi_j$  имеем для полной производной зависимости  $Z(x)$

$$\frac{dZ}{dx} = \sum_{j=1}^n K_j \cdot \frac{d\Pi_j}{dx} = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Z}{\partial \Pi_j} \cdot \frac{d\Pi_j}{dx}. \quad (10)$$

Отсюда получаем выражение для линейного приближения вариации волнового сопротивления при достаточно малых воздействиях по приращениям частных параметров качества относительно номинального режима, характеризуемого  $n$ -мерным вектором  $\overline{\Pi}_n = (\Pi_{j_n}), j = \overline{1, n}$ :

$$\Delta Z(x) = \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial Z}{\partial \Pi_j} \right|_0 \cdot \Delta \Pi_j(x) = \sum_{j=1}^n K_j \Delta \Pi_j(x). \quad (11)$$

Зависимость (11) характеризует взаимосвязь отклонения  $\Delta Z(x)$  волнового сопротивления кабеля от своего номинального значения, рассматриваемого в качестве эксплуатационного показателя качества, с отклонениями технологических параметров качества кабеля от своих номинальных значений. Она позволяет сформулировать требования к предельным допускам отклонений локальных параметров качества, формируемых на промежуточных операциях изготовления кабеля.

Предлагаемая методика использования системного подхода при автоматизации многооперационных непрерывных технологических процессов производства проводных кабелей связи позволяет гарантировать обеспечение требуемого качества кабеля как канала связи с учетом его полосы пропускания.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гроднев И.И., Шварцман В.О. Теория направляющих систем связи. – М.: Связь, 1978. – 296 с.
2. Ефимов Н.Е., Остапкович Г.А. Радиочастотные линии передач. – М.: Связь, 1977. – 408 с.
3. Чостковский Б.К., Смородинов Д.А. Оптимальное управление возмущенным процессом в многоконтурной системе // Вестник Самарского государственного технического университета. – 2009. – № 3(25). – С. 61-66.
4. Пешков И.Б. Мировая кабельная промышленность: переход в новый век // Кабели и провода. – 2001. – № 4. – С. 3-6.
5. Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В. Использование системного подхода при автоматизации непрерывных технологических процессов кабельного производства // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2010. – № 7(28). – С. 26-31.
6. Дорезюк Н.И. Гармонический анализ периодических неоднородностей волнового сопротивления коаксиальных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1974. – № 6. – С. 18-22.
7. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
8. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974.
9. Митрошин В.Н., Митрошин Ю.В. Автоматизация процесса наложения изоляции при непрерывном производстве проводных кабелей связи // Информационные, измерительные и управляющие системы (ИИУС-2010). Материалы Международной научно-технической конференции (Самара, 17-21 мая 2010 г.). – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – С. 36-40.
10. Полиэтилен. Справочное руководство / Под ред. М.И. Гарбара. – Л.: Госхимиздат, 1955.
11. Marinov S., Steller R. Erfassung der Schmelzeströmung in Extrusionsdüsen bei pulsierendem Druckdrähten. – Plaste und Kautschuk, 1985, Bd. 32, № 9, s. 346-349.
12. Митрошин В.Н. Регулирование давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера при пульсирующем градиенте давления // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 1(29). – С. 39-44.
13. Митрошин В.Н. Синтез системы стабилизации давления расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – № 3(31). – С. 237-239.
14. Mikko Rönkä, George Buckbee. Контроль систем регулирования увеличивает отдачу от модернизации

- ции // Автоматизация и IT в нефтегазовой отрасли. – 2011. – № 1(3). – С. 50-53.
15. *Митрошин В.Н.* Математическое описание формирования параметров качества LAN-кабелей при их изготовлении // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2005. – Вып. 37. – С. 54-58.

*Статья поступила в редакцию 29 октября 2013 г.*

## **MULTIPARAMETER CONTROL OF COMMUNICATION CABLES PRODUCTION BASED ON PREDICTIVE MODELS**

***V.N. Mitroshin***

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

*A methodology for automating the production of wired communication cables using advanced process control (APC-systems) based on predictive models to ensure the required quality of the cable as a communication channel based on its bandwidth is proposed.*

***Keywords:*** *multivariable control, predictive models, automation, cable manufacture.*

---

*Vladimir N. Mitroshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*