

УДК 681.5

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА НАЛОЖЕНИЯ ПОЛИМЕРНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПРОВОДНЫХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ¹

В.Н. Митрошин, С.А. Колпациков

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

Аннотация. Рассмотрена процедура выбора показателей качества технологической операции наложения полимерной изоляции при изготовлении проводных кабелей связи. Показано, что показатели качества зависят от вида выпускаемой продукции, типа накладываемой полимерной изоляции, рабочей полосы частот сигнала, передаваемого по кабелю. Предложены пути обеспечения гарантированного поддержания эксплуатационных характеристик изготавливаемого кабеля в течение срока его эксплуатации. Сформулированы задачи, решаемые при автоматизации технологических процессов наложения различных видов полимерной изоляции: сплошной, химически вспененной и физически вспененной.

Ключевые слова: кабели связи, полимерная изоляция, экструзионные линии, автоматизация.

Наряду с волоконно-оптическими линиями связи (ВОЛС) в структурированных кабельных системах (СКС) в качестве передающих сред широко используются проводные кабели связи (КС). Во-первых, это LAN-кабели на основе витых пар. К ним относятся кабели без экранирующего покрытия – UTP (Unshielded Twisted Pair), кабели с общим внешним экраном – STP (Shielded Twisted Pair), а также кабели SSTP (Screened Shielded Twisted Pair), отличающиеся от последних наличием двух защитных экранов: как экранирующих каждую витую пару, так и являющихся общим внешним экраном [1]. Во-вторых, радиочастотные коаксиальные кабели (КК) с соосным расположением внутреннего проводника, изоляции и внешнего проводника-экрана [2]. В третьих, используемые значительно реже симметричные кабели на основе, например, звездной четверки скрученных изолированных жил [3].

Технологический процесс изготовления проводных КС является сложным, непрерывным, многооперационным процессом, в котором качество изготавливаемого кабеля как линии связи определяется неким обобщенным эксплуатационным показателем качества [4]. Показатель качества выпускаемой продукции формируется на всех стадиях производства и может быть измерен лишь на готовом изделии.

Этот факт вызывает необходимость выбора неких показателей качества на каждой промежуточной операции изготовления кабеля, регулирование (или стабилизация) которых гарантирует в конечном итоге получение готовой продукции

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект 18-08-00506-а).

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

Сергей Александрович Колпациков (к.т.н.), доцент кафедры «Автоматика и управление в технических системах».

с требуемыми эксплуатационными свойствами. Как будет показано ниже, решение этой задачи зависит от вида выпускаемой продукции (LAN-кабеля, КК, симметричного кабеля), типа накладываемой полимерной изоляции (сплошной, пенопластовой с химическим вспениванием, пенопластовой с физическим вспениванием), рабочей полосы частот сигнала, передаваемого по изготавливаемому кабелю. Отдельной задачей является гарантированное обеспечение поддержания эксплуатационных показателей выпускаемого изделия в требуемом рабочем диапазоне в течение всего срока его эксплуатации.

Процессы производства различных видов проводных КС имеют как одинаковые технологические операции (изолирование медного проводника полимерным материалом, волочение медного провода, наложение внешней защитной полимерной оболочки кабеля, изготовление экранов), так и свойственные только конкретным видам кабеля. Так, операции скрутки (парной, четверочной и групповой) используются при изготовлении только симметричных и LAN-кабелей. А изготовление экранов, например, даже для кабелей одного вида может существенно отличаться. Экраны могут изготавливаться из гладкой или гофрированной медной фольги, путем повива из медной проволоки и т. д.

Поэтому формирование в процессе производства проводных кабелей их эксплуатационных показателей качества во многом различно и имеет индивидуальные особенности даже для кабелей одного вида, отличающихся различным конструктивным исполнением.

Отмечается [5], что для всех проводных КС важнейшей, в наибольшей степени определяющей качество изготавливаемого изделия, является операция изолирования токопроводящей жилы полимером, осуществляемая методом экструзии на шнековых прессах [6]. Чаще всего в качестве изоляции при изготовлении кабелей используется полиэтилен высокого давления низкой плотности (ПЭНП) – термопластичный материал, обладающий аномалией вязкости [7].

При изготовлении радиочастотных коаксиальных кабелей RG (Radio Guide) и LAN-кабелей, предназначенных для передачи огромного объема информации на сверхвысоких частотах, «единственной возможностью для удовлетворения новым требованиям является применение материалов с прекрасными диэлектрическими свойствами и высокой степенью вспенивания» [8]. В качестве таких изоляционных материалов, отвечающих высоким требованиям стабильности электрических характеристик, в настоящее время применяются фторполимеры (PFA, FEP и т. п.). PFA – перфторированный сополимер (перфторалкокси-сополимер), или фторопласт-50. FEP – это сополимер тетрафторэтилена и гексафторпропилена, или фторопласт 4МБ (Ф-46).

Первичные параметры изолированной кабельной жилы (диаметр изоляции, относительная диэлектрическая проницаемость изоляции, погонная емкость изолированной жилы кабеля), формируемые на экструзионной линии при наложении изоляции, в конечном счете в основном и определяют обобщенный эксплуатационный показатель качества изготавливаемой продукции. В роли этих показателей чаще всего выступают параметры передачи либо параметры влияния кабеля в диапазоне его рабочих частот.

Для коаксиальных кабелей основными показателями качества являются параметры передачи. К обобщенным эксплуатационным показателям качества КК относят такие показатели, которые характеризуют его потребительские свойства как линии связи.

Применимость коаксиального кабеля в том или ином частотном диапазоне

определяется величиной помех в виде так называемых обратного и попутного потоков. Ввиду сложности измерения непосредственно величин обратного и попутного потоков качество кабеля принято нормировать по величине входного коэффициента отражения $\Gamma_{\text{вх}}$ [9]:

$$\Gamma_{\text{вх}} = \frac{1}{2Z_0} \int_0^l Z'(x) \exp(-2\gamma x) dx, \quad (1)$$

здесь Z_0 – номинальное значение волнового сопротивления кабеля;

$\gamma = \alpha + j\beta$ – коэффициент распространения электромагнитной волны;

β – коэффициент фазы;

α – коэффициент затухания;

l – длина кабеля.

$$\beta = \frac{2\pi f}{v}, \quad (2)$$

$$\alpha = a_0 \sqrt{f}, \quad (3)$$

где v – скорость распространения электромагнитной волны по кабелю;

f – частота электрического сигнала;

a_0 – числовой коэффициент, определяемый типом кабеля.

В качестве обобщенного эксплуатационного показателя качества чаще всего принимают легко контролируемый на готовом кабеле показатель – регулярность (однородность) его волнового сопротивления [2, 4, 10], который имеет определяющее влияние на качество коаксиального кабеля (1), а также приращение затухания кабеля $\Delta\alpha l$ на частоте передаваемого сигнала, возникающее за счет переотражений волн на случайных нерегулярностях кабеля. Здесь l – длина кабеля.

Для коаксиального кабеля со сплошной изоляцией и внешним экраном в виде жесткой трубки со сварным швом выражение для волнового сопротивления кабеля будет иметь вид [11]

$$Z = 60 \sqrt{\ln \frac{D}{D_{\text{из}}} \cdot \ln \frac{D}{d} + \frac{1}{\epsilon_{\text{п}}} \cdot \ln \frac{D_{\text{из}}}{d} \cdot \ln \frac{D}{d}}, \quad (4)$$

где $\epsilon_{\text{п}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость полиэтилена;

$D_{\text{из}}$ – диаметр изолированной жилы;

d – диаметр медного проводника;

D – внутренний диаметр экрана.

Если у КК экран выполнен в виде тонкой металлической ленты, вплотную прилегающей к изоляции, либо в виде оплетки из медных проволок, то $D = D_{\text{из}}$ и формула (4) преобразуется к виду

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{п}}}} \ln \frac{D_{\text{из}}}{d}. \quad (5)$$

Так как на экструзионных линиях окончательная вытяжка медной проволоки осуществляется прецизионным способом – через алмазные фильеры, то диаметр медного проводника фактически является постоянной величиной $d = \text{const}$. От-

носительную диэлектрическую проницаемость сплошного полиэтилена также можно считать постоянной.

В этом случае при изготовлении КК с экраном в виде оплетки из медных проволок и изоляцией медного проводника сплошным полимером нерегулярность волнового сопротивления кабеля определяется практически только нерегулярностью диаметра изоляции (5).

Объемная производительность шнекового экструдера $Q(t)$ может быть легко экспериментально определена по контролируемым величинам: диаметру изолированной жилы $D_{из}(t)$ и скорости изолирования $V(t)$:

$$Q(t) = \left[\frac{\pi D_{из}^2(t)}{4} - \frac{\pi d^2}{4} \right] \cdot V(t). \quad (6)$$

Отсюда

$$D_{из}(t) = d \sqrt{1 + k \frac{Q(t)}{V(t)}}. \quad (7)$$

Здесь $k = 4/\pi d^2$, $[m^{-2}]$ – постоянный коэффициент.

Следовательно, основной задачей автоматического управления процессом изготовления КК со сплошной полимерной изоляцией медной жилы является стабилизация объемной производительности шнекового экструдера и скорости изолирования, что обеспечит стабилизацию диаметра изолированной жилы, а в конечном итоге и эксплуатационный показатель качества – волновое сопротивление кабеля.

Для гарантированного обеспечения необходимого эксплуатационного показателя качества выпускаемого кабеля в качестве линии связи во всем рабочем частотном диапазоне рекомендуется выбирать для оценки эффективности управляемого технологического процесса изготовления проводных кабелей связи обобщенный стохастический показатель – спектральную плотность $S_z(g)$ формируемого волнового сопротивления кабеля.

Это объясняется тем, что основные эксплуатационные показатели качества КК – модуль входного коэффициента отражения и приращение затухания кабеля на частоте передаваемого сигнала f – выражаются через величину спектральной плотности волнового сопротивления кабеля на соответствующей пространственной частоте g_0 нерегулярностей изготавливаемого кабеля.

Дисперсия модуля входного коэффициента отражения σ_Γ^2 определяется величиной спектральной плотности функции волнового сопротивления кабеля Z на соответствующей пространственной частоте g_0 [12]:

$$\sigma_\Gamma^2 = \frac{(4 - \pi)\pi^2}{16Z_0^2} \cdot \frac{g_0^2}{\alpha(f)} \cdot S_z(g_0). \quad (8)$$

Связь пространственной частоты нерегулярности волнового сопротивления кабеля g_0 и частоты передаваемого по нему сигнала f определяется выражением

$$g_0 = \frac{2f}{v}, \quad (9)$$

где Z_0 – номинальное значение волнового сопротивления кабеля;

v – скорость распространения сигнала по кабелю.

Математическое ожидание модуля входного коэффициента отражения определяется величиной спектральной плотности волнового сопротивления на пространственной частоте g_o [13]:

$$m_{\Gamma} = \sqrt{\pi/(4 - \pi)} \sigma_{\Gamma}. \quad (10)$$

Приращение затухания кабеля $\Delta \alpha l$ на частоте передаваемого сигнала также выражается через величину спектральной плотности волнового сопротивления кабеля на соответствующей пространственной частоте g_o [14]:

$$\Delta \alpha l = K_o(f) \cdot \frac{1 - e^{-4\alpha l}}{\alpha} \cdot f^2 S_Z(g_o), \quad (11)$$

где K_o – частотно-зависимый коэффициент, определяемый конкретными особенностями кабеля;

$S_Z(g_o)$ – величина двухсторонней спектральной плотности волнового сопротивления на пространственной частоте нерегулярности кабеля g_o , связанной с частотой f передаваемого по кабелю сигнала выражением (9);

l – длина кабеля;

f – частота передаваемого сигнала.

Для улучшения электрических характеристик проводных кабелей, как коаксиальных, так и LAN-кабелей, рассчитанных на передачу высокочастотных сигналов, на медную жилу накладывается пенопластовая (пористая) полимерная изоляция. Существуют два вида пористой изоляции. Первая накладывается на шнековых прессах экструзионных линий методом химического вспенивания [15, 16], а вторая – методом физического вспенивания [8].

Применение в проводных кабелях изоляции со степенью пористости (отношением объема газовых включений к общему объему изоляции) $\delta = 0,5$, с одной стороны, дает значительную экономию полимерного изоляционного материала (до 50 %) и существенное улучшение диэлектрических характеристик изоляции. С другой стороны, становится особенно актуальной задача управления процессом наложения пенопластовой изоляции с целью поддержания высокой степени однородности электрических свойств пористой изоляции [17].

Для случая наложения химически вспененной изоляции формула (5) преобразуется к виду

$$Z = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{\text{пп}}}} \ln \frac{D_{\text{из}}}{d}, \quad (12)$$

где $\epsilon_{\text{пп}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость пенопластовой изоляции.

Из (12) видно, что к факторам, влияющим на эксплуатационные характеристики коаксиального кабеля с пористой изоляцией, добавляется еще один параметр – однородность пористой изоляции (ее относительная диэлектрическая проницаемость). Относительная диэлектрическая проницаемость пенопластовой изоляции влияет на показатели затухания и отражения в кабеле. На рис. 1 представлена схема многосвязного многомерного звена – экструдера для наложения химически вспененной изоляции на медную жилу кабеля как объекта автоматического управления.

Как видно из рис. 1, наложение вспененной изоляции на экструзионных линиях является многосвязным многомерным процессом. В этом его принципиальное отличие от процесса наложения сплошной полимерной изоляции.

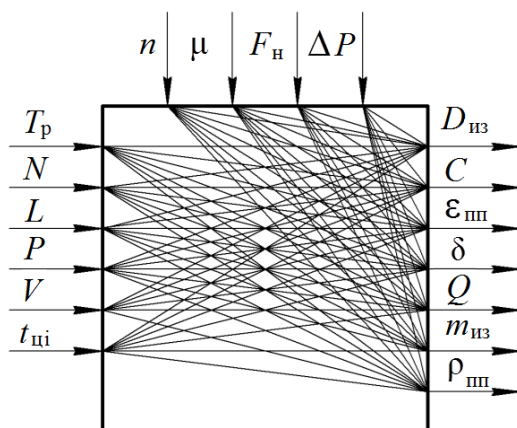


Рис. 1. Схема многосвязного многомерного объекта – экструдера для наложения химически вспененной изоляции

Входными переменными процесса изолирования медного проводника термопластическим полимером, накладываемым методом химического вспенивания, являются:

- T_p – температура расплава полимера в зоне дозирования экструдера;
- N – скорость вращения шнека экструдера;
- L – расстояние от кабельной головки до первой ванны охлаждения;
- P – давление расплава полимера на выходе зоны дозирования экструдера;
- ΔP – перепад давлений расплава полимера на выходе зоны дозирования и в формирующем инструменте экструдера (кабельной головке);
- V – скорость протягивания изолированной жилы (скорость изолирования);
- F_n – натяжение изолируемой жилы;
- $t_{ци}$ – температура зон нагрева цилиндра экструдера ($i = 1 \div 5$).

Некоторые входные переменные должны быть выбраны в качестве управляющих воздействий. Остальные необходимо рассматривать в качестве контролируемых возмущений. К возмущениям, которые невозможно стабилизировать в процессе наложения изоляции, обычно относят:

- n – индекс течения полимера;
- μ – вязкость расплава перерабатываемого полимера.

Непосредственно измеряемыми показателями качества процесса наложения химически вспененной изоляции являются:

- $D_{из}$ – диаметр изолированной жилы;
- C – погонная емкость изолированной жилы.

Ряд выходных переменных процесса наложения химически вспененной изоляции могут быть лишь косвенно оценены по непосредственно измеряемым показателям процесса изолирования. К косвенно оцениваемым показателям относятся:

$\varepsilon_{\text{пп}}$ – относительная диэлектрическая проницаемость пенопластовой изоляции;

δ – степень пористости (вспенивания) пенопластовой изоляции;

Q – объемная производительность шнекового экструдера;

$m_{\text{из}}$ – масса изоляции на единицу длины проводника;

$\rho_{\text{пп}}$ – плотность пенопластовой изоляции.

Процесс наложения химически вспененной изоляции технологически мало отличается от процесса наложения сплошного полимера. Различием является использование порофора – порошка, засыпаемого в экструдер вместе с гранулами полиэтилена. Под действием температуры порофор разлагается с выделением газа, растворенного в расплаве полимера. Степень разложения порофора нелинейно увеличивается от температуры. После выхода изолированной жилы из кабельной головки растворенный в полимере газ расширяется с образованием внутри изоляции газовых пузырьков. Достоинством технологического процесса химического вспенивания изоляции является его простота, а главным недостатком – плохая стабильность процесса, невысокая степень пористости изоляции (до 50 %), значительный размер пор, неравномерность газовых включений по сечению изоляции.

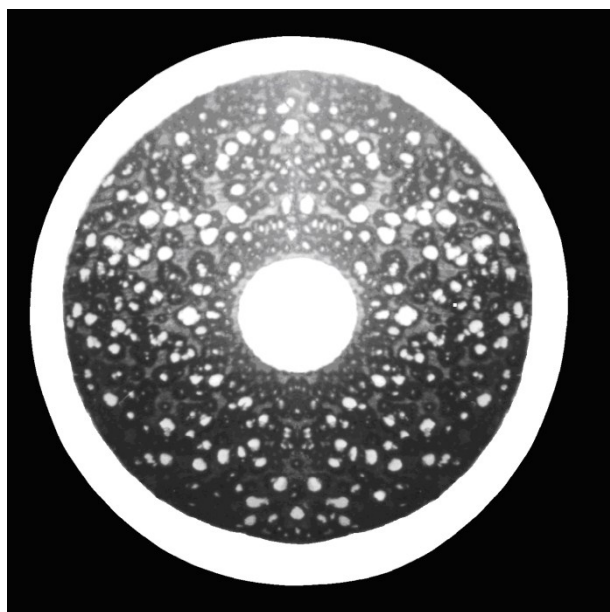


Рис. 2. Срез изолированной пенополиэтиленом методом химического вспенивания жилы коаксиального кабеля зонной связи ВКПАП с диаметром по жиле 2,14 мм, диаметром по изоляции 9,7 мм и средним размером пор 257 мкм

На рис. 2 показан срез наложенной методом химического вспенивания пенопластовой изоляции жилы коаксиального кабеля зонной связи ВКПАП. Наложение изоляции осуществлялось на экструзионной линии ME-90 фирмы Maillefer. Средний размер пор достаточно велик – 257 мкм, поры распределены по сечению изоляции с невысокой степенью равномерности. Это приводит к существенной нерегулярности относительной диэлектрической проницаемости наложенной вспененной изоляции. Как показали проведенные эксперименты,

нерегулярность относительной диэлектрической проницаемости пенопластовой изоляции составила $\pm 0,025$, или 1,63 %. Измерения осуществлялись с помощью оригинального измерителя относительной диэлектрической проницаемости пенопластовой изоляции, разработанного в СамГТУ [18].

Главным недостатком управления процессом наложения химически вспененной изоляции является сложность синтеза системы управления. Использование для управления многосвязным многомерным процессом наложения химически вспененной изоляции многоконтурных систем управления с развязывающими звеньями [15, 19, 20] не обеспечивает решения задачи эффективного управления автоматизируемым процессом в условиях реального производства.

Выход заключается в использовании интеллектуальных (нейросетевых) систем управления данным многосвязным многомерным техпроцессом. С точки зрения гарантированного обеспечения необходимого эксплуатационного показателя качества изготавливаемых проводных кабелей связи (например, требуемой спектральной плотности волнового сопротивления КК) предлагается использовать также системы усовершенствованного управления (АРС-системы) на основе применения прогнозирующих моделей формирования показателя качества кабеля как линии связи [21].

В настоящее время для наложения пенопластовой изоляции проводных кабелей связи, как правило, используется технология физического вспенивания расплава полимера в экструдере азотом, отличающаяся существенно лучшей управляемостью и стабильностью по сравнению с технологией химического вспенивания.

При физическом вспенивании на медный проводник обычно последовательно накладываются три слоя изоляции: сначала тонкий слой сплошного полимера, затем слой физически вспененного термопластичного полимера, а сверху – еще один слой сплошного полимера. Такая изоляция называется skin-foam-skin и используется в проводных кабелях с верхней граничной частотой свыше 100 МГц [1]. Применение skin-foam-skin изоляции позволяет значительно снизить коэффициент затухания кабеля. У кабелей с химически вспененной изоляцией затухание выше более чем на 20 %, а у кабелей со сплошной изоляцией – еще выше.

В настоящее время системы связи согласно действующим стандартам могут работать с проводными кабелями со сплошной изоляцией. Но в будущем «единственным способом достичь необходимых электрических характеристик кабелей при меньших размерах будет вспенивание изоляции» до степени ее пористости порядка 70 % для полиэтилена и фторопластов и максимального размера пор менее 20 мкм. При использовании экструзионной группы, оборудованной системой непрерывного впрыска азота под высоким давлением, удалось получить степень вспенивания изоляции из полиэтилена до 82 %, а из фторопластов – до 70 % [8].

Ведущим производителем экструдеров для изолирования кабельной продукции методом физического вспенивания является компания Mailliefer SA (Швейцария). Она производит широкий диапазон специализированных и многофункциональных экструзионных линий для изолирования как различных типов коаксиальных кабелей, включая микрокоаксиальные кабели, радиочастотные коаксиальные кабели RG (Radio Guide), кабели для систем кабельного телевидения – CATV и крупные радиочастотные кабели, так и жил LAN-кабелей.

Для производства крупногабаритных коаксиальных кабелей с изоляцией из физически вспененного полиэтилена компания Mailliefer использует метод наложения всех трех слоев пленко-пористо-пленочной изоляции через одну много-

слойную головку, что делает экструзионную группу более компактной. Для этих целей разработаны экструдеры NMB 80-30D, NMC 100-36D и NMC 120-36D.

При построении структурированных кабельных систем (СКС) для передачи данных в настоящее время наиболее широко используются LAN-кабели категорий 5е, 6 и 7 (рис. 3). Основным конструктивным элементом таких кабелей является витая пара, состоящая из двух скрученных изолированных кабельных жил.

Для LAN-кабелей основными показателями качества наряду с параметрами передачи являются параметры влияния, например переходные затухания между соседними витыми парами. У SSTP LAN-кабелей (категории 7), отличающихся наличием двух типов защитных экранов (экранирующие каждую витую пару и общий внешний экран) параметры влияния не имеют существенного значения.

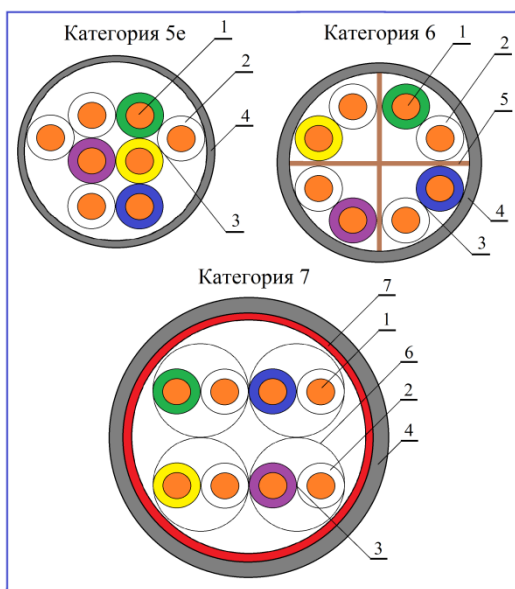


Рис. 3. Конструкция LAN-кабелей различных категорий:

- 1 – токопроводящая жила; 2 – пенопластовая изоляция; 3 – витая пара; 4 – полимерная оболочка; 5 – крестообразный профиль; 6 – экран витых пар из алюмо-полиэтилена; 7 – внешний общий экран (оплетка из медной проволоки)

Для LAN-кабелей категории 7 (с экранированной витой парой) показателями качества являются параметры передачи: величина волнового сопротивления Z_B в данном сечении кабеля и величина собственного затухания $\alpha(f)$ кабеля на частоте f [22].

$$Z_B = \frac{120}{\sqrt{\epsilon_{\text{экв}}}} \cdot \ln \frac{D_{\text{из1}} + D_{\text{из2}} - d}{d} \cdot \frac{4d^2 - (D_{\text{из1}} + D_{\text{из2}})^2}{4d^2 + (D_{\text{из1}} + D_{\text{из2}})^2}. \quad (13)$$

$$\alpha(f) = \frac{2,6\sqrt{f\epsilon_{\text{экв}}} \cdot 10^{-3}}{\lg[(D_{\text{из1}} + D_{\text{из2}} - d)/d]} \cdot \left[\frac{1}{d} + \frac{2d}{(D_{\text{из1}} + D_{\text{из2}})^2} \right] + 9,08f\sqrt{\epsilon_{\text{экв}}} \text{tg}\delta \cdot 10^{-5}. \quad (14)$$

Здесь $d = \text{const}$ – диаметр медных проводников; $D_{\text{из1}}, D_{\text{из2}}$ – диаметры изолированных жил; $\varepsilon_{\text{экв}}$ – эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость скрученной пары; d_s – диаметр экрана; $\text{tg}\delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь изоляции.

Формируемые на операции наложения физически вспененной изоляции и непосредственно измеряемые параметры – диаметр $D_{\text{из}}$ и погонная емкость C изолированной жилы – являются взаимосвязанными величинами [2]:

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln \frac{D_{\text{из}}}{d}}, \quad (15)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума;

ε_r – эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость комбинированной (skin-foam-skin) изоляции.

Для регулирования процесса наложения физически вспененной изоляции предлагается использовать программируемый логический контроллер [8]. При этом регулирование диаметра изоляции осуществляется за счет изменения линейной скорости линии, а регулирование емкости – за счет изменения давления вакуумного насоса, меняющего количество подаваемого азота, и за счет перемещения мобильной части первой ванны охлаждения.

Одной из важнейших задач при изолировании проводных кабелей является выбор режима охлаждения наложенной изоляции. Охлаждение наложенной методом экструзии расплавленной пластмассовой изоляции происходит в процессе непрерывного движения кабельной жилы через водяные ванны охлаждения с заданной постоянной скоростью. На существующих экструзионных линиях длина ванн охлаждения составляет порядка 15 м и более. Выбор режима охлаждения во многом определяет последующие эксплуатационные свойства изготавливаемого кабеля. Термические процессы в экструдированной изоляции влияют на молекулярную структуру, механическое напряженное состояние полимера [23, 24], адгезию изоляции и металлического проводника, образование пустот в изоляции [25, 26] и качество ее граничной поверхности. Необходимо обеспечить стабильность электрических характеристик кабеля при старении изоляции. Несоблюдение оптимальных температурных режимов охлаждения кабельной изоляции может вызвать ее ускоренное старение, что приводит к выходу кабеля из строя, например при растрескивании изоляции. Необходимо знание не только конечной температуры полимерной изоляции по окончании охлаждения, но и распределение температурного поля вдоль всего охлаждаемого участка.

При этом проблема оптимизации режима охлаждения изоляции сводится к выбору управления по граничным условиям за счет изменения температуры воды в ваннах охлаждения, обеспечивающего в условиях заданных ограничений получение требуемого распределения температуры изоляции на выходе из участка охлаждения с заданной точностью при экстремальном значении выбранного критерия качества.

Данная проблема рассматривалась в классе задач управления с распределенными параметрами. Оптимальное охлаждение наложенной изоляции, с одной стороны, гарантированно обеспечило охлаждение полимерной изоляции без воз-

никновения в ней внутренних напряжений, а с другой – позволило значительно снизить затраты энергоресурсов на подогрев воды [27].

В заключение можно констатировать, что постановка задачи автоматического управления наложением полимерной изоляции при изготовлении проводных кабелей связи принципиально отличается в зависимости от вида выпускаемой продукции, типа накладываемой изоляции и рабочей полосы частот изготавливаемого кабеля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенов А.Б., Стрижаков С.К., Сунчелей И.Р. Структурированные кабельные системы. – М.: Компания АйТи, ДМК Пресс, 2002. – 640 с.
2. Белоруссов Н.П., Гроднев И.И. Радиочастотные кабели. – М.: Энергия, 1973. – 328 с.
3. Гроднев И.И., Верник С.М. Линии связи: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1988. – 544 с.
4. Ефимов И.Е., Останкович Г.А. Радиочастотные линии передачи. Радиочастотные кабели. – М.: Связь, 1977. – 408 с.
5. 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. – Вып. 1 (29). – С. 39–44.
6. Раувендааль К. Экструзия полимеров / Пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Профессия, 2008. – 768 с.
7. Торнер Р.В. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1977. – 464 с.
8. Бонвин П.-И., Родригез Р., Чамов А.В. Линии изолирования коаксиальных кабелей с процессом физического вспенивания ExtrucellTM // Кабель-news. – 2010. – № 2. – С. 13–18.
9. Дорезюк Н.И. Гармонический анализ периодических неоднородностей волнового сопротивления коаксиальных кабелей // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1974. – № 6. – С. 18–22.
10. Дорезюк Н.И., Попов М.Ф. Радиочастотные кабели высокой регулярности. – М.: Связь, 1979. – 104 с.
11. Митрошин В.Н. Автоматизация технологических процессов производства кабелей связи. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 140 с.
12. Чостковский Б.К. Методы и системы оптимального управления процессами производства кабелей связи. – М.: Машиностроение, 2009. – 190 с.
13. Чостковский Б.К., Митрошин В.Н. Стратегия синтеза и оптимизации цифровых систем управления технологическими процессами производства кабелей связи // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2017. – № 4(56). – С. 65–75.
14. Чостковский Б.К. Математическая модель формирования обобщенных параметров качества нерегулярных кабелей связи в стохастической постановке // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2006. – Вып. 42. – С. 147–161.
15. Merki H.A. Control of diameter and capacitance of products with cellular insulation // Wire Ind. – 1983. – vol. 50. – № 389. – P. 39–42.
16. Boysen R.L. How to solve problems in the extrusion of cellular PE in coaxial cables // Wire Journ. – 1972. – v. 5. – № 1. – P. 51–56.
17. Гроднев И.И., Фролов П.А. Коаксиальные кабели связи. – М.: Радио и связь, 1983. – 208 с.
18. А.с. СССР 1112314, G01R 27/18. Устройство для контроля диэлектрической проницаемости изоляции кабельных жил / Б.К. Чостковский, В.Н. Митрошин, Д.А. Уклеин, А.А. Павлов. – № 3529090/18-21, заявл. 18.06.1982, опубл. 07.09.1984, Бюл. № 33/1984 – 6 с.
19. Savolainen A., Heino A., Lehtinen O. Insulation of telephone singles with cellular polythene. – Wire Industry, 1984, vol. 51, № 612, p. 907–909.
20. Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H. Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer kabelummantelungsanlage. – Mess. – Steuern – Regeln, 1979, 22, № 1, s. 28–31.
21. Митрошин В.Н. Многопараметрическое управление производством кабелей связи на основе прогнозирующих моделей // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2013. – № 4(40). – С. 37–44.
22. Прокудина Е.О., Митрошин В.Н. Управление процессом изолирования проводных кабелей связи на основе системного подхода // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – Вып. 2 (46). – С. 196–199.

23. Ковригин Л.А. Расчет механических напряжений в изоляции кабелей с учетом зависимости модуля Юнга от температуры // Вестник ПГТУ. Технологическая механика. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2002. – С. 64–70.
24. Овсиенко В.Л., Шувалов М.Ю., Крючков А.А., Троицкая Г.А. Внутренние механические напряжения в изоляции высоковольтных кабелей и их влияние на электрическую прочность // Электротехника. – 1999. – № 8. – С. 28–33.
25. Карякин Н.Г., Фурсов П.В. Расчет возможности образования воздушных включений в пластмассовой изоляции кабеля при охлаждении // Электротехническая промышленность. Сер. Кабельная техника. – 1977. – № 5. – С. 8–11.
26. Костенко Э.М., Перфильев А.Н. Исследование усадки кабельной полиэтиленовой изоляции // Конструирование и исследование высокочастотных кабелей. – Л.: Связь, 1974. – С. 180–187.
27. Mitroshin V.N., Mitroshin Y.V. Optimal control of cable insulation cooling at extrusion line // IEEE Xplore, 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016, Pages: 1–4, DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910886.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2018 г.

AUTOMATION OF THE ISOLATION PROCESS BY POLYMER IN THE MANUFACTURE OF WIRED COMMUNICATION CABLES

V.N. Mitroshin, S.A. Kolpashchikov

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

Abstract. *The procedure for selecting the quality indicators of the technological operation of applying polymer insulation in the manufacture of wired communication cables has been considered. It is shown that the quality indicators depend on the type of products, the type of polymer insulation applied, the working frequency band of the signal transmitted through the cable. Ways to ensure the guaranteed maintenance of the performance characteristics of the cable being manufactured during its service life have been proposed. Problems are formulated to solve when automating technological processes of superimposing various types of polymer insulation: continuous, chemically foamed and physically foamed.*

Keywords: *communication cables, polymer insulation, extrusion lines, automation.*

REFERENCES

1. Semenov A.B., Strizhakov S.K., Suncheley I.R. Structured Cabling Systems. Moscow: IT Co., DMK Press, 2002. 640 p. (In Russian).
2. Belorussov N.P., Grodnev I.I. Radio Guide Cables. Moscow: Energy, 1973. 328 p. (In Russian).
3. Grodnev I.I., Vernik S.M. Communication lines: Textbook for universities. Moscow: Radio i Svyaz', 1988. 544 p. (In Russian).
4. Efimov I.E., Ostan'kovich G.A. Radio frequency transmission lines. Radio Guide Cables. Moscow: Svyaz', 1977. 408 p. (In Russian).
5. Mitroshin V.N. Control of Melt Polymer Pressure in the batching Zone of the Single-Screw Extruder with pulsating Pressure Gradient // Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences". № 1 (29). 2011. P. 39–44 (In Russian).
6. Rauwendaal C. Polymer Extrusion. SPb: Profession, 2008. 768 p. (In Russian).
7. Torner R.V. Theoretical bases of polymer processing. Moscow: Chemistry, 1977. 464 p. (In Russian).
8. Bonvin P.-I., Rodriguez R., Chamov A.V. Insulation lines for coaxial cables with physical foaming process ExtrucellTM // Cable-news. Vol. 2. 2010. P. 13–18 (In Russian).

*Vladimir N. Mitroshin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Sergey A. Kolpashchikov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

9. *Dorezyuk N.I.* Harmonic analysis of periodic inhomogeneities of the wave resistance of coaxial cables // *Electrotechnical industry. A series of "Cable Technology"*. Vol. 6. 1974. P. 18-22 (In Russian).
10. *Dorezyuk N.I., Popov M.F.* High Frequency Radio Frequency Cables. Moscow: Svyaz', 1979. 104 p. (In Russian).
11. *Mitroshin V.N.* Automation of technological processes for the production of communication cables. Moscow: Mashinostroenie-1, 2006. 140 p. (In Russian).
12. *Chostkovsky B.K.* Methods and systems for optimal control of communication cable production processes. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 190 p. (In Russian).
13. *Chostkovsky B.K., Mitroshin V.N.* Strategy of Synthesis and Optimization of digital Control Systems of technological Processes of Communication Cables Production // *Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences"*. № 4 (56). 2017. P. 65–75 (In Russian).
14. *Chostkovsky B.K.* Mathematical model of the formation of generalized quality parameters of irregular communication cables in a stochastic formulation // *Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Physics and Mathematics Sciences"*. Vol. 42. 2006. P. 147–161 (In Russian).
15. *Merki H.A.* Control of diameter and capacitance of products with cellular insulation // *Wire Ind.* vol. 50. № 389. 1983. P. 39–42.
16. *Boysen R.L.* How to solve problems in the extrusion of cellular PE in coaxial cables // *Wire Journ.* Vol. 5. № 1. 1972. P. 51–56.
17. *Grodnev I.I., Frolov P.A.* Coaxial communication cables. Moscow: Radio i Svyaz', 1983. 208 p. (In Russian).
18. Patent of USSR 1112314, G01R 27/18. Device for controlling the dielectric constant of the insulation of cable cores / B.K. Chostkovsky, V.N. Mitroshin, D.A. Uklein, Pavlov A.A. № 3529090/18-21, stated 18.06.1982, published 07.09.1984, newsletter № 33/1984. 6 p. (In Russian).
19. *Savolainen A., Heino A., Lehtinen O.* Insulation of telephone singles with cellular polythene // *Wire Industry.* Vol. 51. № 612. 1984. P. 907–909.
20. *Laurich K., Muller G., Bluckler B., Wallau H.* Untersuchung einer Zweigroßenregelstrecke an einer Kabelummantelungsanlage // *Mess.-Steuern-Regeln.* 22. № 1. 1979. S. 28–31.
21. *Mitroshin V.N.* Multiparameter Control of communicating Cables Production based on predictive Models // *Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences"*. № 4 (40). 2013. P. 37–44 (In Russian).
22. *Prokudina E.O., Mitroshin V.N.* Control of Telecommunication Cable Isolation Process by Means of the System Approach // *Bulletin of the Samara State Technical University. A series of "Technical Sciences"*. № 2 (46). 2015. P. 196–199 (In Russian).
23. *Kovrigin L.A.* Calculation of mechanical stresses in the insulation of cables, taking into account the dependence of the Young's modulus on temperature // *Collection of scientific papers "Bulletin of Perm State Technical University. Technological mechanics"*. Perm: Publishing house PSTU, 2002. P. 64–70 (In Russian).
24. *Ovsienko V.L., Shuvalov M.Yu., Kryuchkov A.A., Troitskaya G.A.* Internal mechanical stresses in insulation of high-voltage cables and their effect on dielectric strength // *Electrical Engineering.* № 8. 1999. P. 28–33 (In Russian).
25. *Karyakin N.G., Fursov P.V.* Calculation of the possibility of the formation of air inclusions in plastic insulation of the cable during cooling // *Electrotechnical industry. A series of "Cable Technology"*. Vol. 5. 1977. P. 8–11 (In Russian).
26. *Kostenko E.M., Perfilyev A.N.* Study of shrinkage of polyethylene cable insulation // *Design and study of high-frequency cables.* Leningrad: Svyaz', 1974. P. 180–187 (In Russian).
27. *Mitroshin V.N., Mitroshin Y.V.* Optimal control of cable insulation cooling at extrusion line // *IEEE Xplore*, 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2016, Pages: 1–4, DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7910886.