

В.М. Золотарев, Ю.А. Антонец, С.Ю. Антонец, О.В. Голик, Л.А. Щебенюк

## ОН-ЛАЙН КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТНОСТИ ИЗОЛЯЦИИ В ПРОЦЕССЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭМАЛЬПРОВОДОВ

*Представлено результати неруйнівного технологічного контролю кількості дефектів в ізоляції емаль проводу на основі поліімідного полімеру. Розглянуто застосування статистичного аналізу результатів вимірювання показників контролю за допомогою математичної моделі тренду для використання результатів в активному технологічному контролі. Запропоновано рекомендації щодо практичного використання параметрів функції тренду для контролю гарантованого рівня бездефектності ізоляції методами статистики граничних значень. Параметром тренду є швидкість зменшення (чи збільшення) довжини проводу з заданою дефектністю впродовж технологічного циклу. Теоретично показана і вимірюваннями підтверджена можливість кількісної оцінки тенденції зміни дефектності емаль ізоляції для проводу ПЭЭИДХ2 – 200 з двошаровою поліімідною ізоляцією номінальним діаметром 0,56 мм впродовж неперервного технологічного циклу. Визначення кількісної оцінки тенденції зміни дефектності емаль ізоляції дозволяє також виділити і кількісно оцінити випадкову похибку технологічного процесу – сумарну похибку результатів технологічного контролю, яка є кількісною характеристикою випадкової складової стабільності технологічного процесу і зумовлена багатьма чинниками, кожною з яких можна знехтувати порівняно із сумою. Бібл. 10, рис. 5.*

*Ключові слова:* емаль провід, поліімідна ізоляція, дефектність ізоляції, технологічний контроль, випробування напруженою.

*Представлены результаты неразрушающего технологического контроля количества дефектов в изоляции эмаль провода на основе полиимидного полимера. Рассмотрено применение статистического анализа результатов измерения показателей контроля с помощью математической модели тренда для использования результатов в активном технологическом контроле. Предложены рекомендации для практического использования параметров функции тренда для контроля гарантированного уровня бездефектности изоляции методами статистики предельных значений. Параметром тренда является скорость уменьшения (или увеличения) длины провода с заданной дефектностью в течение технологического цикла. Теоретически показана и подтверждена измерениями возможность количественной оценки тенденции изменения дефектности эмальизоляции для провода ПЭЭИДХ2 – 200 с двухслойной полиимидной изоляцией номинальным диаметром 0,56 мм в течение технологического цикла. Определение количественной оценки тенденции изменения дефектности эмаль изоляции позволяет также выделить и количественно оценить случайную ошибку технологического процесса – суммарную ошибку результатов технологического контроля, которая является количественной характеристикой случайной составляющей стабильности технологического процесса и обусловлена большим количеством причин, каждой из которых можно пренебречь по сравнению с суммой. Библ. 10, рис. 5.*

*Ключевые слова:* эмаль провод, полиимидная изоляция, дефектность изоляции, технологический контроль, испытания напряжением.

**Постановка проблеми.** Емальпровід на основі поліімідних синтетических сополімерів з температурним індексом 200 °С має високі електричні та механічні властивості ізоляції [1, 2]. Внедрення таких інноваційних видів кабельно-проводникової продукції в виробництво дозволяє забезпечити найвищий сучасний рівень електричної, механічної міцності та нагрієвостійкості виткової ізоляції обмоток електричних машин і апаратів – масової продукції електромашиностроєння.

Для виробництва таких проводів застосовують сучасні автоматичні лінії з високими швидкостями (до 1000 м/хв) і глибоким каталітичним віджигом розчинників емальпаст [2]. Освоєння подібної продукції, інноваційної для конкретного виробника, вимагає застосування системи оперативного технологічного контролю, який забезпечує ліквідність продукції при досягнутому рівні технічних параметрів. При цьому контроль і аналіз дисперсії основних технічних параметрів продукції є базовою інформацією для реалізації принципу неперервного підвищення якості згідно ISO 9001: 2015.

Проблема для конкретного виробника складається в розробці та впровадженні нестандартних технічних і організаційних рішень технологічного контролю з обов'язковою прив'язкою допуску технічних параметрів до досягнутого рівня технології виробництва. Існує протиріччя між відносно високою ціною інноваційної продукції, виготовленої за допомогою сучасних передових технологій і матеріалів, з однієї сторони, і необхідністю організації технологічного контролю дисперсії технічних параметрів в процесі неперервного автоматичного технологічного циклу, який потребує додаткових витрат, з іншої.

Задача, на перший погляд, здається такою, якої немає рішення для виробників в період освоєння нової продукції в світі, але інноваційною саме для них, продукції. Прикладом може служити концепція «Шість сигма («6σ»)» [3]. В ній основним критерієм якості продукції є її однорідність, яку кількісно відображає загальноприйнята характеристика розкиду параметрів – їх середньоквадратичне відхилення  $\sigma$ . Показателем однорідності, що використовується в маркетингу, є

отношение диапазона допустимых значений основного параметра к экспериментально определенному значению  $\sigma$ . Концепция «Six Sigma Methodology» является демонстрацией достижений производителя в отрасли качества, но не содержит методологии обеспечения этих достижений.

Приведенный пример свидетельствует о том, что противоречия между относительно высокой стоимостью инновационной продукции и необходимостью дополнительных затрат на организацию технологического контроля инновационного процесса ее изготовления является одной из основных проблем технологического развития предприятия. И чем больше технологический цикл автоматизирован, тем больше эта проблема становится актуальной. При этом ее решение требует принятия нестандартных технических и технологических решений, поскольку между задачами приемочного и текущего технологического контроля существует значительное и теоретическое, и техническое различие [4]. Проблема организации активного технологического контроля является концептуальной для современного, нацеленного на развитие и автоматизацию, производителя массовой продукции.

**Анализ литературы.** Поскольку данная проблема тесно связана с экономической составляющей массового производства, в [1] предложено разрешить противоречия между относительно высокой стоимостью продукции и ценовым фактором, как критерием ликвидности для проводов с полиимидной изоляцией, путем снижения уровня требований к напряжению пробоя, согласованного с потребителем. На наш взгляд, внедрение спектра технических требований на одну и ту же продукцию значительно расширяет диапазон применимых технических требований. Это, как минимум, размывает диапазоны допустимых значений параметров одного и того же изделия, усложняет взаимоотношения между производителем и заказчиком продукции, но не решает проблемы применения эффективного технологического контроля.

Первые концептуальные работы, посвященные задачам текущего технологического контроля, датированы началом 60-х XX в. и их итог сформулирован в [5]: «В отличие от приемочного контроля, где определяется степень пригодности уже готовых партий продукции, текущий контроль должен обеспечить нормальный ход технологического процесса». Это значит, что в самой постановке вопроса о технологическом контроле заложена возможность изменений в технологическом процессе и необходимость оперативного обнаружения и количественной оценки таких изменений. Теоретически это означает, что каждый очередной результат, полученный при технологическом контроле, является элементом иного, неизвестного статистического массива. Поэтому статистическая процедура обработки результатов технологического контроля требует разработки алгоритма обработки и представления результатов; алгоритма принятия решений. Приведенная общая концепция технологического контроля [4] является актуальной. Ее конкретные реализации в автоматизированных и скоростных непрерывных технологических циклах современного кабельного производства требуют кроме

практически мгновенной оперативности (режим онлайн) [2, 3, 5] решения ряда проблем: научных и технических.

Научные проблемы обусловлены следующим.

Измерение дисперсии технического параметра в процессе производства по методу получения и представления результатов является опосредствованным и относительным. К этим измерениям не может применяться классическая (каноническая) модель измерения, поскольку она требует выполнения трех условий [3]:

- время измерения не ограничено;
- измеренная величина сохраняет истинное значение неизменным в течение всего цикла измерений;
- все факторы, влияющие на результат, точно определены.

Как минимум первые два условия в принципе не могут быть выполнены при измерении дисперсии технического параметра в конкретной задаче текущего технологического контроля. Поэтому в данном случае приемлемой является только статистическая модель при которой измеряемая величина является последовательностью значений, которые дают информацию о текущем состоянии объекта измерений. При этом истинное значение величины может оставаться неопределенным на данном интервале процесса измерения [2].

Поэтому в каждом непрерывном технологическом процессе необходима разработка статистической модели конкретного процесса технологического контроля, которая включает: статистическую модель процесса измерения дисперсии параметров, алгоритм обработки и представления результатов.

Технические проблемы обусловлены тем, что на основе анализа влияния составляющих технологического процесса на формирование электрофизических параметров изделия необходимы:

- 1) выбор операций, которые являются определяющими для обеспечения качества продукции;
- 2) выбора измеряемых параметров, которые являются определяющими для обеспечения качества продукции;
- 3) определения технологических допусков для выбранных параметров;
- 4) определения периодичности измерений и минимального объема выборки.

При этом необходимо разделить тенденции изменения контрольного параметра как функции технологического времени и случайной погрешности технологического процесса. Указанное разделение может быть выполнено по известной статистической модели тренда с ошибкой (только ошибка является случайной величиной) для ряда наблюдений за значениями величины  $x$  [7]:

$$x_i = f(t_i) + \delta_i, \quad (1)$$

где  $t_i$  – детерминированная переменная, которая является технологическим временем;  $f(t_i)$  – детерминированная функция (тренд технологического процесса);

$\sigma_i$  – случайная величина (случайная составляющая стабильности технологического процесса).

Мировые производители оборудования для эмальпроводов на основе полиимидных синтетических сополимеров [3] для текущего технологического контроля используют современные высокоэффективные системы непрерывного статистического контроля удельного числа дефектов ( $er$ ) изоляции в режиме *онлайн*. Число дефектов – это число мест, в которых ток через изоляцию превышает установленный. Дискретное измерение тока через изоляцию под воздействием высокого напряжения постоянного тока обеспечивает система EFHP фирмы MAG-ECOTESTER [3]. Статистические показатели числа дефектов изоляции, зафиксированные для каждой катушки, хранятся на магнитных носителях для дальнейшего анализа. Это – пример современного технологического контроля, в котором критерии принятия технологических решений устанавливает производитель.

**Цель работы.** Оценка **гарантированного уровня бездефектности изоляции** эмальпроводов, изолированных полиимидными сополимерами на основе разделения:

- **тренда** технологического процесса – существенного детерминированного изменения результатов технологического контроля в течение технологического процесса;

- статистической **погрешности** технологического процесса – суммарной погрешности результатов технологического контроля, которая является количественной характеристикой случайной составляющей стабильности технологического процесса.

**Основные результаты.**

Результаты измерения количества дефектов провода в процессе изготовления в течение 24 часов показывают наличие двух различных периодов при непрерывном автоматизированном процессе. Существенное различие динамики изменения дефектности в эти периоды свидетельствует о том, что в технологическом цикле следует различать периоды приработки (повышенная, но быстро снижающаяся дефектность изоляции в начале цикла) и нормального изолирования (дефектность изоляции стабильна).

Рассмотрение результатов контроля дефектности эмальпровода как единого статистического массива возможно с помощью выбора соответствующей функции для тренда, в данном случае экспоненциальной (рис. 1,а). Однако существенное различие динамики изменения дефектности в периоды приработки и нормального изолирования обуславливает существенную разницу в оценке статистической ошибки контроля (рис. 1,б). Поэтому для решения поставленной задачи: разработки метода оценки **гарантированного уровня бездефектности изоляции** использовано разделение массива данных на – детерминированную линейную функцию  $f(t_i)$  (тренд: сплошная линия) и случайную величину  $\delta_i$  в соответствии с моделью тренда с ошибкой (1) в [7] (см. рис. 2).

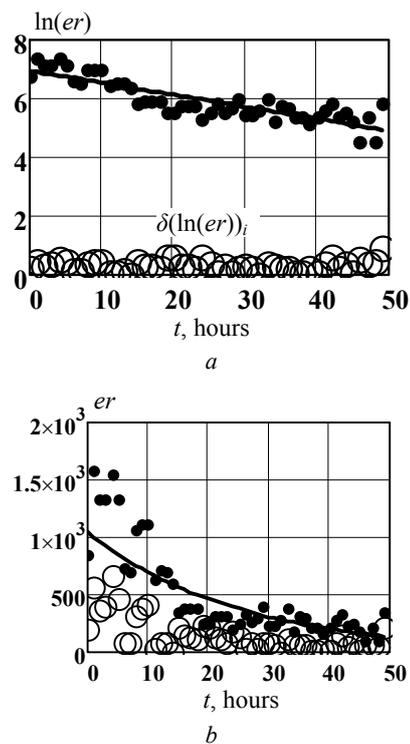


Рис. 1. Разделение массива данных о количестве дефектов на катушке (черные точки) на – детерминированную функцию  $f(t_i)$  (тренд: сплошная линия экспоненциальная функция) и случайную величину  $\delta_i$  (пустые точки) с помощью различных математических процедур разделения

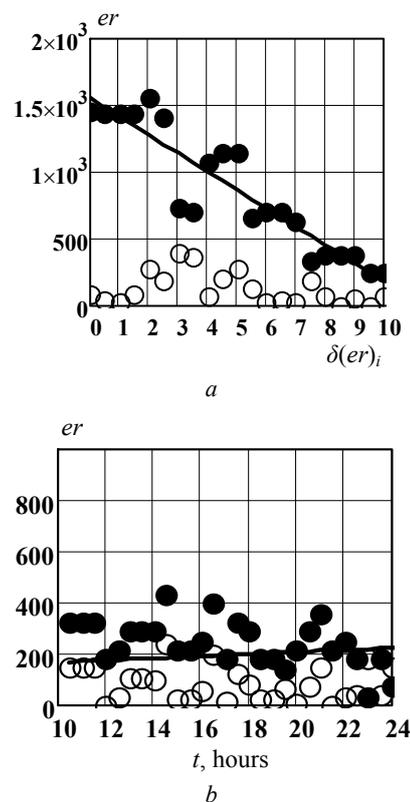


Рис. 2. Разделение массивов данных о количестве дефектов на катушке (черные точки) на – детерминированную линейную функцию  $f(t_i)$  (тренд: сплошная линия) и случайную величину  $\delta_i$  (пустые точки) для двух периодов в непрерывном автоматическом процессе изготовления: первый (а) период приработки и последующий (б) период нормального изолирования

Представление результатов контроля дефектности эмальпровода двумя статистическими массивами (рис. 2) показывает, что случайная составляющая (ошибка технологического процесса) в период нормального изолирования стабильна и может быть количественно определена и ее среднее значение составляет в данном случае 10 % от среднего количества дефектов за весь период наблюдений. Именно эта величина является количественной оценкой случайных отклонений в технологическом процессе и должна быть предметом статистического контроля в системе обеспечения однородности продукции.

В то же время тренд количества дефектов в период нормального изолирования, поскольку он определен детерминированной функцией, должен быть предметом анализа для специалистов технологов, поскольку именно **тренд количества дефектов в период нормального изолирования** определяет критерий для оптимальной длительности непрерывного технологического цикла. В данном случае наблюдается слабый положительный тренд: увеличение количества дефектов ( $2 \pm 1$ ) дефекта в час, что позволяет определить время оптимальной длительности непрерывного технологического цикла.

Иная ситуация существует в периоде приработки. Данные рис. 2, *b* свидетельствуют о необходимости технических решений, в первую очередь, по сокращению периода приработки. Количественным критерием при этом является отрицательный коэффициент тренда. В данном случае минус ( $125 \pm 7$ ) дефекта в час. Несомненной задачей технолога является обеспечение увеличения этого параметра по абсолютной величине вдвое.

Тенденция изменения (тренд) значений контролируемого параметра в течение непрерывного технологического цикла характерно не только для дефектности изоляции. На рис. 3 приведены результаты относительного изменения диаметральной толщины эмальизоляции  $\delta l$  в непрерывном процессе изготовления 60 катушек эмальпровода.

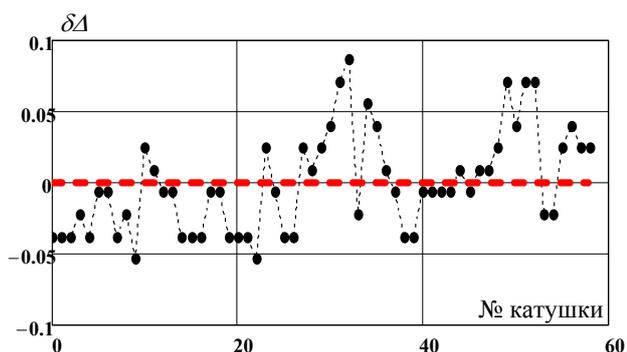


Рис. 3. Относительное изменение диаметральной толщины эмальизоляции  $\delta l$  в непрерывном процессе изготовления эмальпровода ПЭЭИДХ2-200-МЭК диаметром 0,56 мм

Здесь также очевидно наличие тренда, поэтому стандартная оценка дисперсии параметра включает и случайный его разброс (статистическая ошибка) и влияние параметров детерминированной составляющей (тренда). В данном случае тренд толщины изоляции обусловлен технологической вытяжкой медной

проволоки, которая допустима (менее 0,5 % диаметра), но оказывает влияние на толщину эмальизоляции.

Только когда параметры тренда и его причина определены (обязанности инженера-технолога), может быть выполнен контроль дисперсии контролируемого параметра, для этого в массовом производстве должна использоваться унифицированная методика оценки случайной составляющей дисперсии параметра.

Дисперсии нормируемых параметров провода могут быть определены после его изготовления (прежде всего, дисперсия напряжения пробоя), поэтому такой контроль в условиях производства остается в значительной мере пассивным.

В системе EFHP [3] результаты испытаний представлены в режиме on-line на мониторе, результаты хранятся на магнитных носителях (преимущество системы). Однако, в производственной практике эти результаты не используются как количественные показатели. Для оценки гарантированного уровня бездефектности изоляции необходимо выделить случайную ошибку технологического контроля. Для этого должна использоваться унифицированная оценка случайной составляющей дисперсии параметра катушки после выделения детерминированного тренда и оценена вероятность появления максимального количества дефектов на катушке (см. рис. 4).

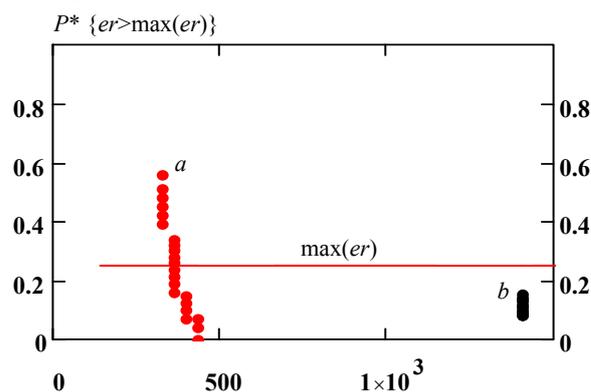


Рис. 4. Зависимость вероятности превышения максимального количества дефектов на катушке от максимального количества зафиксированных дефектов (на длине 3600 м) как оценка гарантированного уровня однородности эмальизоляции, полученная с помощью предельного распределения максимальных значений в периоды приработки (повышенная, но быстро снижающаяся дефектность изоляции в начале непрерывного технологического цикла *a*) и нормального изолирования (дефектность изоляции стабильна длительно *b*): видно, что использование математического аппарата предельных значений позволяет четко различать период технологической приработки и период нормального хода технологического процесса

Математическая процедура выделения тренда процесса позволяет организовать активный контроль случайной составляющей дефектности (ошибка технологического процесса). С помощью статистических процедур дискретных интервальных моделей [2] производится оценка, анализ и принятие текущего технического решения относительно дисперсии дефектности каждой очередной катушки провода на протяжении всего технологического цикла.

Например, при контроле диаметра эмальпровода  $D$  используется статистическая процедура оценки максимальной вероятности  $P_{\max}$  выхода контролируемого параметра  $\Delta D$  за границы диапазона  $\underline{E} \dots \bar{E}$ , определенная как сумма соответствующих вероятностей выхода параметра за односторонние границы [4]. Причем, вероятность выхода контролируемого параметра  $\Delta D$  за нижнюю границу взята с минусом:

$$P_{\max i} = \sup(P_{\max i}) - \inf(P_{\max i}); \quad (2)$$

$$\sup(P_{\max i}) = [\sup(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2 / \{[\sup(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2 + [\bar{E} - 0,5(D_{i2-1} + D_{i2})]^2\}]; \quad (3)$$

$$\inf(P_{\max i}) = [\inf(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2 / \{[\inf(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2 + [\underline{E} - 0,5(D_{i2-1} + D_{i2})]^2\}]; \quad (4)$$

где  $D$  – диаметр провода;  $\bar{E}$  – верхняя технологическая граница диаметра;  $\underline{E}$  – нижняя технологическая граница диаметра;  $\Delta D_{i2}$  – разность между текущим диаметром в выборке №  $i:2$  и средним значением диаметра, определенным в течение технологического цикла ( $i$ : № измерения):

$$\Delta D_{i2} = D_{i2} - (i)^{-1} \cdot \sum D_k, k = 1 \dots i. \quad (5)$$

Значение  $[\sup(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2]$  в (3) – квадрат наибольшего текущего изменения диаметра в выборке №  $i:2$  в сторону верхней технологической границы. Значение  $[\inf(\Delta D_{i2}; \Delta D_{i2-1})^2]$  в (4) – квадрат наибольшего текущего изменения диаметра в сторону нижней технологической границы.

На рис. 5 приведены результаты контроля диаметра ( $a$ ) эмальпровода с полиимидной изоляцией в непрерывном технологическом цикле и представлена контрольная карта максимальной вероятности выхода диаметра за границы диапазона  $\underline{E} \dots \bar{E}$  ( $b$ ), определенная в соответствии с (2) – (5).

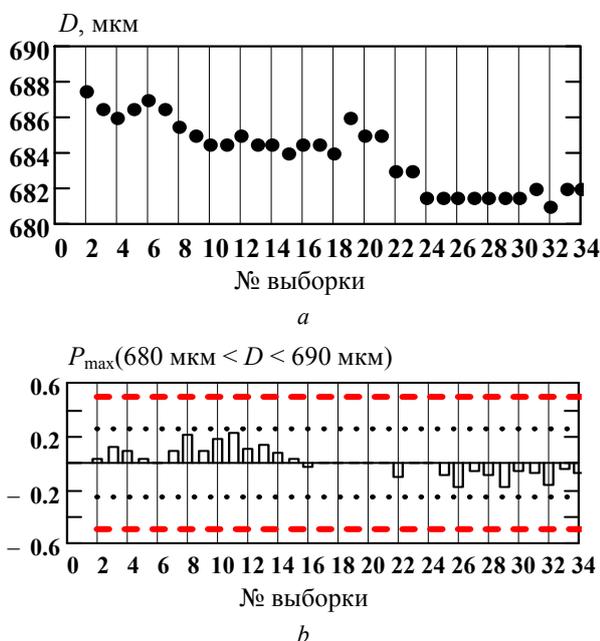


Рис. 5. Результаты контроля диаметра ( $a$ ) эмальпровода в непрерывном технологическом цикле и контрольная карта максимальной вероятности выхода диаметра за границы нормативного диапазона ( $b$ )

Сопоставление рис. 5, $a$  и рис. 5, $b$  свидетельствует об информативности технологического контроля

максимальной вероятности  $P_{\max}$  выхода параметра за границы заданного двустороннего диапазона:

1) контрольная карта отражает период технологической стабильности, в течение которого  $P_{\max}$  не превышает по абсолютной величине уровень 0,25 (пунктир) – уровень наибольшей чувствительности контроля к увеличению отклонения от среднего;

2) контрольная карта также отражает стабильную тенденцию уменьшения значений контрольного параметра, которая позволила определить причину тенденции уменьшения  $D$ , – возрастание вытяжки проводника в течение технологического цикла.

Выделение **тренда** технологического процесса дает возможность оценить количественно неслучайную тенденцию изменения контролируемого параметра, как результат **определимых технологических причин**. Без такой оценки само понятие технологического контроля не имеет смысла, поскольку исключает обратную связь в системе организации такого контроля. Кроме того, выделение **тренда** технологического процесса дает возможность оценить случайную ошибку технологического контроля, которая обусловлена суммарным влиянием множества таких факторов, влиянием каждого из которых можно пренебречь по сравнению с суммой.

Необходимость использования процедуры разделения массива данных технологического контроля на детерминированную и случайную составляющие обусловлена фундаментальным отличием задач приемочного и технологического контроля. Это фундаментальное отличие отмечалось специалистами [4]. Задача технологического контроля – обеспечение возможности активной коррекции технологического процесса, что невозможно без выделения **определимых технологических причин** тренда контролируемого параметра.

#### Выводы.

1. Выполнена оценка **гарантированного уровня бездефектности изоляции** эмальпроводов, изолированных полиимидными сополимерами. Вероятность того, что максимальное количество зафиксированных на длине 3600 м дефектов не более 1400 в период приработки, и 400 дефектов на длине 3600 м в период нормального изолирования, составляет более 80 %.

2. Разработана и использована при организации технологического контроля дефектности эмальпровода с двойной изоляцией на основе полиимидных сополимеров статистическая процедура разделения массива данных технологического контроля на детерминированную (тренд) и случайную составляющую (статистическая ошибка технологического процесса). Выделение тренда дает возможность оценить количественно неслучайную тенденцию изменения контролируемого параметра, как результат **определимых технологических причин**.

3. Тренд количества дефектов в период нормального изолирования (рис. 2, $b$ ) слабый положительный: увеличение дефектности ( $2 \pm 1$ ) дефектов в час. Оценка тренда дефектности в этот период может быть использована для определения времени оптимальной длительности непрерывного технологического цикла.

4. В период приработки отрицательный коэффициент тренда (в данном случае минус  $(125 \pm 7)$  количества дефектов в час) использован для оценки длительности приработки и контроля мероприятий по его сокращению вдвое.

5. Выделение случайной составляющей позволяет количественно оценить ошибку технологического процесса, снижение которой требует комплексного подхода, называемого в мировой практике методом Деминга [10]. Случайная составляющая (ошибка технологического процесса) в период нормального изолирования стабильна, ее среднее значение составляет в данном случае 10 % от среднего количества дефектов за весь период наблюдений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленецкий Ю.А. О совершенствовании технической документации на эмалированные провода // Кабели и провода. – 2013. – №5. – С. 19-23.
2. Щебенюк Л.А., Антонеч С.Ю. Статистичний апарат забезпечення бездефектності продукції в виробництві емальних проводів // Вісник НТУ «ХПІ». – 2012. – №23. – С. 166-169.
3. Голик О.В. Исследование дефектности нагревостойких проводов с двойной полиимидной эмальюизоляцией при испытаниях высоким напряжением на проход // Український метрологічний журнал. – 2009. – №1. – С. 15-18.
4. Голик О.В. Статистические процедуры при двустороннем ограничении контролируемого параметра в процессе производства кабельно-проводниковой продукции // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – №5. – С. 47-50. doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.07.
5. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
6. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели. М.: Радио и связь. 1991. – 352 с.
7. Тутубалин В.Н. Статистическая обработка рядов наблюдений. – М.: Знание, 1973. – 64 с.
8. Андрианов А.В., Андрианов В.К., Быков Е.В. О статистике точечных повреждений обмоточных проводов и витковых замыканий обмоток // Кабели и провода. – 2013. – №5. – С. 28-31.
9. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.
10. Mary Walton. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming. – New York: NY 10016 Copyright, 1986. – 262 p.

#### REFERENCES

1. Zelenetsky Yu.A. About the improvement of technical documentation for enameled wires. *Cables and wires*, 2013, no.5, pp. 19-23. (Rus).
2. Shchebeniuk L.A., Antonets S.Yu. Statistical method purpose is the reduce of quantifying defects of enameled wire. *Bulletin of NTU «KhPI»*, 2012, no.23, pp. 166-169. (Ukr).
3. Golik O.V. Quantifying of defects for enameled wire with two-sheeted polyimide isolation by tests by high voltage. *Ukrainian metrological journal*, 2009, no.1, pp. 15-18. (Rus).
4. Golik O.V. Statistical procedures for two-sided limit of a controlled parameter in the process of production of cable and wire products. *Electrical Engineering & Electromechanics*, 2016, no.5, pp. 47-50. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2016.5.07.

5. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.O., Solovjev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti* [Mathematical methods in theory of reliability]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 524 p. (Rus).

6. Kuznetsov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli* [Interval statistical models]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 352 p. (Rus).

7. Tutubalin V.N. *Statisticheskaya obrabotka ryadov nabludeni* [Statistical analysis of observation series]. Moscow, Znanie Publ., 1973. 64 p. (Rus).

8. Andrianov A.V., Andrianov V.K., Bykov E.V. About the statistics of pin-hole damages of winding wires and inter-turn short-circuits in windings. *Cables and wires*, 2013, no.5, pp. 28-31. (Rus).

9. Technical Report IVA Laboratories: Breakdown voltage. – classified: October 2007. – p. 18.

10. Mary Walton. *The Deming Management Method*. Foreword by W. Edward Deming. New York: NY 10016 Copyright, 1986. 262 p.

Поступила (received) 11.05.2017

Золотарев Владимир Михайлович<sup>1</sup>, д.т.н., проф.,

Антонеч Юрий Афанасьевич<sup>1</sup>, к.т.н.,

Антонеч Станислав Юрьевич<sup>2</sup>, аспирант,

Голик Оксана Вячеславовна<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,

Щебенюк Леся Артемовна<sup>2</sup>, к.т.н., проф.,

<sup>1</sup> ПАО «ЗАВОД ЮЖКАБЕЛЬ»,

61099, Харьков, ул. Автогенная, 7,

тел/phone +380 57 7545312; e-mail: zavod@yuzhcable.com.ua,

antonets@yuzhcable.com.ua

<sup>2</sup> Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,

тел/phone +380 57 7076544,

e-mail: unona928@gmail.com, agurin@kpi.kharkov.ua

V.M. Zolotaryov<sup>1</sup>, Yu.P. Antonets<sup>1</sup>, S.Yu. Antonets<sup>2</sup>, O.V. Golik<sup>2</sup>, L.A. Shchebeniuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Private Joint-stock company Yuzhcable works,

7, Avtogenynaya Str., Kharkiv, 61099, Ukraine.

<sup>2</sup> National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

2, Kyrypychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

#### Online technological monitoring of insulation defects in enameled wires.

*In this paper the authors used non-destructive technological monitoring of defects insulation enameled wire with polyimide polymer. The paper is devoted to the statistical method for processing, comparison and analysis of results of measurements of parameters of insulation of enameled wire because of mathematical model of trend for application in active technological monitoring is developed; the recommendations for parameters of such monitoring are used. It is theoretically justified and the possibility of determination of dependence of the error on the velocity of movement of a wire for want of quantifying of defects in enameled insulation by non-destructive tests by high voltage. The dependence of average value of amount of defects for enameled wire with two-sheeted polyimide insulation in a range of nominal diameter 0.56 mm is experimentally determined. The technological monitoring purpose is to reduce the quantifying defects of enameled insulation. References 10, figures 5.*

**Key words:** enameled wire, polyimide insulation, defects of insulation, technological monitoring, tests by voltage.