

## ИССЛЕДОВАНИЕ КОРЕЛЛЯЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДВОЙНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ЭМАЛЬПРОВОДОВ

Золотарев В.М., к.т.н., Антоненц Ю.А., к.т.н.  
ЗАО "Завод Южкабель"

Гурин А.Г., д.т.н., проф., Щебенюк Л.А., к.т.н., доц., Голик О.В.  
Национальный технический университет "ХПИ"  
Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПИ", кафедра "Электроизоляционная и кабельная техника"  
тел. (057) 70-76-663, E-mail: agurin@kpi.kharkov.ua

*Досліджено кореляцію показників стабільності електричних та механічних параметрів подвійної ізоляції емальованого дроту, вимірюваних в процесі технологічного контролю.*

*Установлена кореляція показателів стабільності електричних і механічних параметрів емальпровода з двоїною ізоляцією, ізмеряємих в процесі технологічного контролю*

Высокие скорости изготовления эмальпроводов на современном оборудовании, на котором предусмотрен компьютерный мониторинг однородности эмалевого изоляционного слоя, обуславливают актуальность исследования корреляции традиционно определяемых электрических и механических свойств изоляции эмальпроводов и результатов испытаний их напряжением на проход. Это позволяет анализировать и обобщать результаты мониторинга технологического процесса изготовления эмальпровода.

Контроль стабильности технологических процессов является одной из самых актуальных задач современного массового производства [1]. Для оценки уровня однородности массовой продукции в современной концепции "Шесть сигм" ("6σ") [2, 3] и в отечественных стандартах [4] используется классический вероятностный математический аппарат для оценивания среднеквадратического отклонения  $\sigma$  контролируемого параметра [2, 3] или для оценивания вероятности безотказной работы технологической системы [4]. На практике, когда параллельно контролируется множество различных параметров, применение классических методов возможно только при условии взаимной независимости контролируемых параметров. Иначе необходимость применения математического аппарата условных вероятностей делает задачу оценивания стабильности технологической системы крайне сложной и практически не поддающейся унификации. В [5] для решения этой задачи в технологическом контроле изоляции силовых кабелей успешно применен математический аппарат интервальных статистических моделей. Для использования разработанного метода в технологическом контроле изготовления эмальпроводов необходимо исследование корреляции традиционно определяемых электрических и механических свойств изоляции эмальпроводов и результатов испытаний их напряжением на проход при высоких скоростях работы современного эмальпровода. Корреляция непосредственных значений контролируемых параметров изоляции эмальпроводов практически отсутствует. Поэтому актуально

исследование корреляции электрических и механических свойств изоляции эмальпроводов методами интервальных статистических моделей.

В качестве единого показателя стабильности технологического процесса для всех контролируемых параметров выбрана величина максимальной вероятности выхода контролируемого параметра  $Y$  за нормативный предел  $\alpha$ :  $P_{\max}\{Y < \alpha_{\min}\}$  или  $P_{\max}\{Y > \alpha_{\max}\}$  в зависимости от того, ограничен данный параметр сверху или снизу. Разработаны алгоритмы расчета с учетом особенностей конкретных методик измерения контролируемых параметров.

В качестве контролируемых параметров используются:

пробивное напряжение изоляции эмальпровода  $U_{пр}$ , определяемое для пяти образцов от каждой катушки и ограниченное снизу (не менее  $\alpha_{\min}$ );

число двойных ходов  $N$  стальной иглы до пробоя изоляции, определяемое для четырех образцов от каждой катушки и ограниченное двумя нормативными пределами снизу (среднее из четырех не менее  $\alpha_{ср\min}$  и минимальное из четырех не менее  $\alpha_{\min}$ );

число слабых мест  $E$  на каждых 100 м провода при испытании высоким напряжением на проход на эмальагрегате фирмы MAG, величина  $E$  ограничена сверху (не более  $\alpha_{\max}$ ), причем в зависимости от группы изоляции и диаметра провода конкретные значения  $\alpha_{\max}$  различны и в соответствии с п.1.4.2 ТУ 16.К71-278-98 равны от 3 до 180.

Особенностью двойной изоляции эмальпровода является то, что в случае существенного различия электрических характеристик двух слоев при испытаниях высоким напряжением на проход и при больших скоростях движения провода в электродах, на результаты испытания могут влиять физические процессы переноса и накопления зарядов на границе раздела слоев изоляции. Если к диэлектрику, состоящему из двух слоев, в которых электрофизические свойства постоянны в пределах слоя и меняются скачком при переходе от слоя к слою, приложить постоянное электрическое поле, то практически мгновенно в диэлек-

трике распределение поля устанавливается в соответствии с диэлектрическими проницаемостями слоев:  $\varepsilon_1 E_1(0) = \varepsilon_2 E_2(0)$ .

С течением времени происходит накопление зарядов на границе раздела слоев и устанавливается стационарное состояние, соответствующее распределению поля в соответствии с удельными электропроводностями. Длительность этих переходных процессов определяет время релаксации  $\tau$ , которое для двухслойного диэлектрика равно:

$$\tau = (\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_0 / d_1 + \varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0 / d_2) / (\gamma_1 / d_1 + \gamma_2 / d_2), \quad (1)$$

где  $d_1$ ,  $\varepsilon_1$ ,  $\gamma_1$  и  $d_2$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\gamma_2$  - соответственно толщина, относительная диэлектрическая проницаемость и удельная электропроводность слоев диэлектрика,  $\varepsilon_0$  - электрическая постоянная. Результаты расчетов  $\tau$  с помощью (1) для значений указанных величин, характерных для изоляции эмальпровода свидетельствуют о том, что при различии  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  на один порядок и при одинаковой толщине слоев  $\tau$  составляет несколько десятых секунды. А при таком же различии удельных электропроводностей, но при значительном различии толщины слоев (например, внутренний слой с  $\gamma_1$  составляет одну десятую толщины остальной изоляции)  $\tau$  составляет от нескольких десятых секунды до нескольких секунд. Эти значения  $\tau$  соизмеримы с временем измерения тока через изоляцию при больших скоростях движения провода в эмальагрегате (100 м/мин и выше). Следовательно число слабых мест  $E$ , фиксируемое при испытаниях на проход, не просто отражает наличие механических неоднородностей изоляции типа местных посторонних включений или снижений толщины, как это характерно для испытаний на проход, например, пластмассовой изоляции проводов [5], а связано с электрическими свойствами слоистой структуры изоляции. Таким образом, все контролируемые параметры изоляции эмальпровода связаны с ее электрофизическими характеристиками и не являются независимыми.

Первичные массивы данных для расчета максимальной вероятности выхода контролируемого параметра  $Y$  за нормативный предел  $\alpha$  формируются с учетом особенностей конкретной методики измерений и характера нормативного ограничения, например, для числа двойных ходов  $N$  стальной иглы до пробоя изоляции. Величина  $N$  определяется для четырех образцов от каждой катушки. Полученные значения не должны быть меньше установленных предельных значений. Для оценки  $P_{\max}\{Y < \alpha_{\min}\}$  формируются два массива:  $N_s$  - средние четырех последних измерений;  $N_m$  - минимальные из четырех последних измерений:

$$N_{s_i} = \frac{1}{4} \cdot \sum_{k=i-4}^i N_k, \quad (2)$$

где  $i \in [1, 2, \dots, j/4]$ ;  $j$  - число измерений  $N$ .

$$N_{m_i} = \min(N_{i-4}, N_{i-3}, N_{i-2}, N_{i-1}, N_i). \quad (3)$$

Для каждого из двух массивов существует своя нормативная граница: для  $N_s$  это  $\alpha_{\min s}$ , для  $N_m$  это  $\alpha_{\min m}$ . Для других параметров, например, для числа

слабых мест  $E$ , первичным массивом является непосредственно массив измеренных значений.

Исходными данными для расчета  $P_{\max}\{Y < \alpha_{\min}\}$  (или, например для  $E$ ,  $P_{\max}\{Y > \alpha_{\max}\}$ ) являются две выборки значений из первичного массива: все значения  $\{Y_1, Y_j\}$  контролируемого признака за период наблюдений; пять последних значений признака  $\{Y_{j-4}, Y_j\}$ .

Расчетные статистические показатели при ограничении сверху:

Среднее значение признака за период наблюдений:

$$M_i = \frac{1}{j} \cdot \sum_{k=1}^j Y_k \quad (4)$$

Среднее из пяти последних значений признака:

$$M5_i = \frac{1}{5} \cdot \sum_{k=j-4}^j Y_k \quad (5)$$

Среднее отклонение признака от нормативного предела:

$$\alpha_j = \alpha_{\max} - M5_j. \quad (6)$$

Наибольшая величина квадрата отклонения признака от его среднего значения:

$$M_{\max j} = (\sup_{k \in \{j-4, j\}} (Y_k - M_j))^2. \quad (7)$$

Максимальная вероятность выхода признака за нормативный предел:

$$P_{\max j}\{Y > \alpha_{\max}\} = M_{\max j} / (M_{\max j} + \alpha_j^2). \quad (8)$$

Схема формирования статистических показателей для расчета максимальной вероятности выхода параметра за нормативный предел по результатам контроля при ограничении снизу приведена на рис. 1.

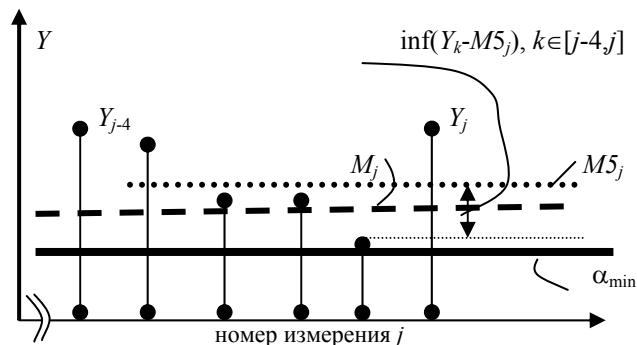


Рис.1

Результаты расчетов компьютер наносит на контрольную карту после каждого измерения признака, вся информация хранится на магнитных носителях.

Анализ контрольных карт (рис.2) вероятности  $P_{\max}$  выхода параметра за нормативный предел для пробивного напряжения (3), числа двойных ходов стальной иглы до пробоя (2) и числа слабых мест на 100 м длины (3) свидетельствует о том, что наблюдается достаточно высокая корреляция между кривыми и области стабильности и нестабильности технологического процесса практически одновременно отмечены всеми контролируруемыми параметрами.

При использовании (8) в зависимости от того, какое ограничение является естественным для контролируемого параметра, могут быть удобными различные выражения.

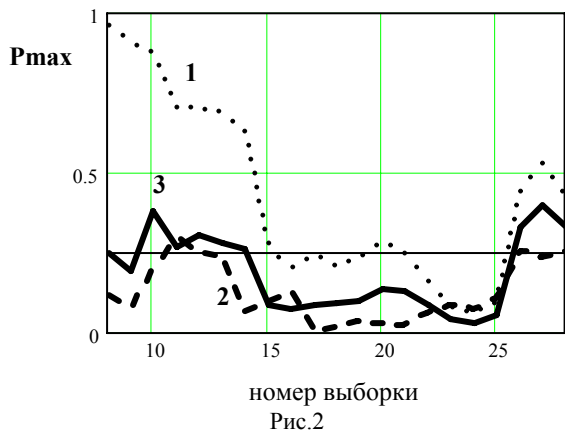


Рис.2

Так при ограничении технологического параметра сверху:

$$P_{\max} = (\sup(Y_k - M5_j))^2 / ((\sup(Y_k - M5_j))^2 + (\alpha_j)^2), \quad (9)$$

При ограничении технологического параметра снизу:

$$P_{\max} = (\inf(Y_k - M5_j))^2 / ((\inf(Y_k - M5_j))^2 + (\alpha_j)^2), \quad (10)$$

Если обозначить  $\sigma = \sup(Y_k - M5_j)$  при ограничении параметра сверху и  $\sigma = \inf(Y_k - M5_j)$  при ограничении параметра снизу, то соотношения (9) и (10) могут быть описаны функцией двух переменных, имеющих вполне целесообразный технический смысл и естественные для задач активного контроля ограничения:

$$P_{\max} = \sigma^2 / (\sigma^2 + \alpha^2), \quad (11)$$

где при ограничении сверху:  $\alpha \geq \sigma; \alpha > 0; \sigma > 0$ ;

и при ограничении снизу:  $\alpha \leq \sigma; \alpha < 0; \sigma < 0$ .

Основным соотношением для анализа чувствительности контроля в зависимости от значений указанных технических параметров является полный дифференциал функции (11):

$$dP_{\max} = (\partial P_{\max} / \partial \sigma) d\sigma + (\partial P_{\max} / \partial \alpha) d\alpha = \{2\sigma\alpha^2 / (\sigma^2 + \alpha^2)^2\} d\sigma - \{2\alpha\sigma^2 / (\sigma^2 + \alpha^2)^2\} d\alpha. \quad (12)$$

Изображение  $dP_{\max}$  при  $\alpha > 0; \sigma > 0$  приведено на рис 3.

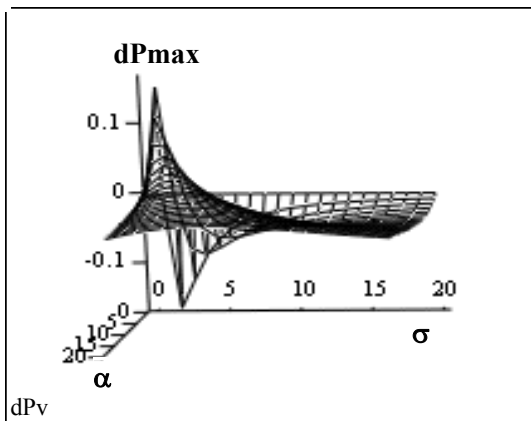


Рис.3

Соответствующий график линий равного дифференциала для контроля параметра при его ограничении сверху, то есть при  $\alpha > 0; \sigma > 0$ , представлен на рис. 4.

При  $\alpha \geq \sigma$  (что технически естественно в задачах технологического контроля) область возможных значений  $\alpha$  и  $\sigma$  находится между осью  $\alpha$  и нулевой диагональю. Значения  $\alpha$  и  $\sigma$ , лежащие на прямой, прохо-

дящей через большие оси эллиптических кривых равного дифференциала, соответствуют наибольшей чувствительности контроля. Контроль характеризуется максимальной чувствительностью при  $\alpha/\sigma \approx 3$  и чувствительность быстро снижается при увеличении  $\alpha$ .

Приведенный анализ позволяет сделать два принципиальных для организации контроля вывода:

- при очень малом по сравнению с полем допуска рассеянии признака контроль по количественному признаку с традиционными границами регулирования и правилами принятия решений не имеет смысла из-за практически нулевой чувствительности к отклонениям в технологическом процессе; этой ситуации соответствует область, непосредственно прилегающая к оси  $\alpha$  на рис.4 при больших относительных значениях  $\alpha$ ;

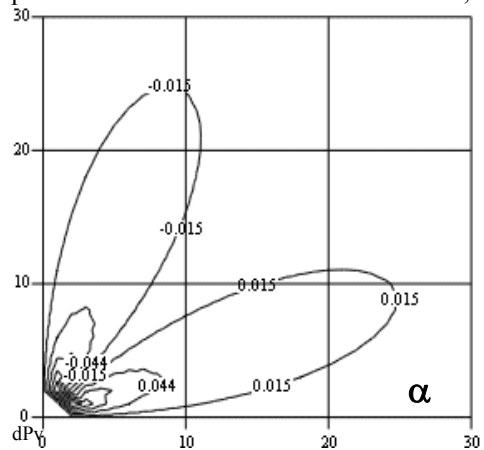


Рис.4

- контроль по количественному признаку эффективен в том случае, если нормативный предел находится во вполне определенном соотношении с достигнутым уровнем стабильности технологического процесса, а именно при  $\alpha/\sigma \approx 3$ .

Эти выводы свидетельствуют о необходимости организации контроля по количественному признаку с переменным технологическим нормативным пределом, который должен быть установлен в соответствии с достигнутым уровнем стабильности технологической системы и который сам являлся бы достаточно универсальным и стабильным показателем достигнутого уровня.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mary Walton. The Deming Management Method. Foreword by W. Edward Deming. New York, NY 10016, Copyright 1986, p.262.
- [2] Dave Harrold. Designing for Six Sigma Capability.-Control Engineering, 1999, January.-Pg.62-70.
- [3] Адлер Ю.П., ШперВ.Л. "Шесть сигм": еще одна дорога, ведущая к храму. // Методы менеджмента качества. Октябрь 2000.-С. 15 – 23.
- [4] ГОСТ 27.203-83. "Технологические систем?. Общие требования к методам оценки надежности".
- [5] Золотарьов В.М., Науменко О.А.. Стандартизація випробувань ізоляції на прохід. // КарпушенкоВ.П., Щебенюк Л.А., Антоненць Ю.О., НауменкоО.А. Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ.2000.- С. 270 – 289.

Поступила 20.09.2004