

О.В. Голик

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПРОЦЕДУРЫ ПРИ ДВУХСТОРОННЕМ ОГРАНИЧЕНИИ КОНТРОЛИРУЕМОГО ПАРАМЕТРА В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА КАБЕЛЬНО-ПРОВОДНИКОВОЙ ПРОДУКЦИИ

Розглянуті питання статистичного контролю у процесі виробництва масової кабельно-провідникової продукції на прикладі емальпроводів. Отримані результати безпосереднього контролю діаметра емальдроту з поліімідною ізоляцією у неперервному технологічному циклі. Представлена контрольна карта максимальної ймовірності виходу діаметру за межі визначеного діапазону. Бібл. 5, рис. 1.

Ключові слова: емальдріт, подвійна поліімідна ізоляція, контрольна карта, максимальна ймовірність виходу параметра за нормативну межу.

Рассмотрены вопросы статистического контроля в процессе производства массовой кабельно-проводниковой продукции на примере эмальпроводов. Получены результаты непосредственного контроля диаметра эмальпровода с полиимидной двухслойной изоляцией в непрерывном технологическом цикле. Представлена контрольная карта максимальной вероятности выхода диаметра за пределы определенного диапазона. Библ. 5, рис. 1.

Ключевые слова: эмальпровод, двойная полиимидная изоляция, контрольная карта, максимальная вероятность выхода параметра за нормативный предел.

Введение. В процессе контроля качества изоляции эмальпровода удобным является использование так называемой контрольной карты. Контрольная карта — это специальный бланк, на который выносят статистические показатели для измеряемого признака в хронологической последовательности изготовления [1]. На бланке нанесены контрольные границы, которые ограничивают область допустимых значений статистических показателей. Если в процессе контроля результаты выходят за нормативную границу, то это воспринимается, как информация об отклонении технологического процесса от нормы. Главным при использовании контрольных карт является то, какой способ используется для определения контрольных границ.

На производстве чаще всего применяют следующие виды карт: карту средних арифметических, карту среднеквадратичного отклонения, карту числа дефектов на единицу продукции. Наиболее эффективным является использование подобных контрольных карт в комплексе: от этапа входного контроля до выходного. При этом необходимо выбирать такой вид и параметры карты, которые были бы информативными на всех этапах контроля. Например, применение для построения карт математического аппарата интервальных статистических моделей.

Анализ публикаций. В [2] вопросы о теоретическом обосновании применения методов интервальных статистических моделей к нижним значениям интервального среднего решено, по сути, одной фразой: «все брать с минусом». Для решения прикладных математических задач технологического контроля этого недостаточно, так как при двухсторонних ограничениях нижние и верхние значения отклонения контролируемого параметра могут появиться в любой последовательности.

Для всех ограниченных признаков f , принадлежащих классу $\mathfrak{Z}_{00} : \mathfrak{Z}_{00} = \{f : \sup |f(x)| < \infty\}$ существуют интервальные средние $\underline{M}f ; \overline{M}f$. Аксиомы интер-

вальных моделей средних, принятые в [2] как основные, однозначно связывают нижнее и верхнее среднее путем перемены знака контролируемого признака. Для всех ограниченных сверху признаков:

$$\mathfrak{Z}_0 = \{f : \sup f(x) < \infty\}; \overline{M}f < \infty.$$

Согласно аксиоме обращения [2] для всех ограниченных снизу признаков: $\underline{M}(-f) = -\overline{M}f$, откуда $\underline{M}(-f)$ определено на $-\mathfrak{Z}_0$.

То есть перемена знака у признаков класса $\mathfrak{Z}_0$ приводит к классу $\mathfrak{Z}_0$, на котором существуют нижние средние $\underline{M}f$, а на их пересечении существуют те и другие, то есть интервальные средние.

Такое однозначное связывание нижнего и верхнего среднего путем перемены знака может в принципе противоречить физическому смыслу некоторых параметров в реальных задачах контроля. Однако оно может быть удобным для математического описания и одновременно быть физически адекватным, если в конкретной задаче использовать *центрированный* набор признаков.

Цель статьи — исследование максимальной чувствительности контроля при двухстороннем ограничении контролируемого параметра в процессе производства силовых кабелей и проводов.

Результаты исследований. Использование центрированного набора признаков становится принципиальным для реальной задачи контроля, в которой измеряемая величина является только положительной, а технологическое ограничение двустороннее.

Функция $g(x)$, мажорирующая набор первичных признаков $f(x)$, принадлежит полулинейной оболочке с неотрицательными коэффициентами c_i^+ и произвольным свободным членом c : $g(x) = c + \sum c_i^+ g_i(x)$; $g(x) \geq f(x)$. Центрирование мажорирующей функции $g(x)$ позволяет найти наилучшую аппроксимацию первичной функции $f(x)$ [2].

© О.В. Голик

$$g_i^{\circ}(x) = g_i(x) - \bar{M}g_i; \quad \bar{M}g_i^{\circ} = 0;$$

$$\bar{M} = \inf \left\{ c + c_i^+ g_i(x) : c + c_i^+ g_i(x) \geq f(x) - \sum c_i^+ g_i(x) \right\} = (1)$$

$$= \inf \sup \left[f(x) - \sum c_i^+ g_i^{\circ}(x) \right].$$

Кроме того, центрирование мажорирующей функции $g(x)$ позволяет использовать в реальном контроле отклонение измеряемого параметра от его первичного среднего, то есть вместо x использовать Δx , что позволяет снять указанное противоречие между рассматриваемой положительной случайной величиной измеряемой характеристики при контроле с двусторонним ограничением, с одной стороны, и аксиомой обращения [2] для всех ограниченных снизу признаков, с другой: $\underline{M}(-f) = -\bar{M}(f)$ откуда $\underline{M}(-f)$ определено только на $-\mathfrak{T}_0$.

Например, для контроля первичного признака тангенса угла диэлектрических потерь в [3] в качестве контролируемого признака использовано отклонение измеряемого параметра Y от его первичного среднего $M^*[Y]$ и использовать мажорирующую функцию в виде параболы с тремя параметрами:

$$g(Y - M[Y]) = C + C_{2(+)}((Y - M[Y]) - C_1)^2, \quad (2)$$

которая мажорирует индикаторный признак (относительное количество значений первичного признака, которые попали в заданный интервал) $\alpha_1 \dots \alpha_2$, и если верхнее ограничение α_2 не имеет технического смысла, как в задаче о контроле тангенса угла диэлектрических потерь, то:

$$A\{\alpha_1 \leq (Y - M[Y]) \leq \alpha_2\} \leq C + C_{2(+)} \quad (3)$$

$$\alpha_1 - C_1)^2 \geq 1.$$

То, что $M(Y - M^*[Y]) = 0$, для минимально мажорирующей функции $\inf \left\{ C + C_{2(+)}^2 (\alpha_1 - C_1)^2 \right\} = 1$ определяет параметры параболы:

$$C = 0, C_1 = -M_{\max}((Y - M[Y]))/\alpha_1, \quad (4)$$

$$C_{2(+)} = (\alpha_1 - C_1)^{-2}.$$

Соотношения (3), (4) позволили использовать оценку относительного максимального количества значений первичного признака, которые превысили верхнюю допустимую границу α_1 для организации контроля при технологическом ограничении сверху [3]:

$$A_{\max}\{\Delta Y \geq \alpha_1\} = (1 + \alpha_1^2/M_{\max}[(\Delta Y)^2])^{-1}, \quad (5)$$

где индикаторный признак $A_{\max}$ – это относительное максимальное среднее количество значений первичного признака, превысивших α_1 , то есть максимальная вероятность выхода контролируемого параметра ΔY за верхнюю границу α_1 : $P_{\max}\{\Delta Y \geq \alpha_1\}$.

Для двустороннего ограничения в соответствии с аксиомой обращения [2] интервальных моделей средних, нижнее и верхнее среднее связывают путем перемены знака контролируемого признака. Например, при контроле диаметра эмальпровода D максимальная вероятность $P_{\max}$ выхода контролируемого параметра

за границы диапазона $\bar{E} \dots \underline{E}$ определена как сумма соответствующих вероятностей выхода параметра за односторонние границы. Причем, вероятность выхода контролируемого параметра ΔD за нижнюю границу взята с минусом:

$$P_{\max i} = \overline{P_{\max i}} - \underline{P_{\max i}}; \quad (6)$$

$$\overline{P_{\max i}} = \frac{[\sup(\Delta D_{i,2} \Delta D_{i,2-1})]^2}{[\sup(\Delta D_{i,2} \Delta D_{i,2-1})]^2 + (\bar{E} - \frac{1}{2} \sum_{i=2-1}^{i,2} D)^2}; \quad (7)$$

$$\underline{P_{\max i}} = \frac{[\inf(\Delta D_{i,2} \Delta D_{i,2-1})]^2}{[\inf(\Delta D_{i,2} \Delta D_{i,2-1})]^2 + (\underline{E} - \frac{1}{2} \sum_{i=2-1}^{i,2} D)^2}. \quad (8)$$

где D – диаметр провода; $\bar{E}$ – верхняя технологическая граница диаметра; $\underline{E}$ – нижняя технологическая граница диаметра; $\Delta D_{i,2}$ – разность между текущим диаметром в выборке № i и средним значением диаметра, определенном в течение технологического цикла: $\Delta D_{i,2} = D_{i,2} - \frac{1}{i * 2} \sum_1^{i,2} D$.

На рис. 1 приведены результаты непосредственного контроля диаметра эмальпровода с полиимидной изоляцией в непрерывном технологическом цикле и представлена контрольная карта максимальной вероятности выхода диаметра за границы диапазона, определенная в соответствии с (6) – (8).

Сопоставление рис. 1,а и рис. 1,б 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), который аналитически из (9) отражает возрастание чувствительности контроля при увеличении отклонения от среднего;

2) контрольная карта отражает стабильную тенденцию уменьшения значений контрольного параметра, которая позволила предупредить выход $P_{\max}$ за уровень 0,25, что позволило определить причину тенденции уменьшения D – возрастание вытяжки проводника в течение технологического цикла

При этом использовано аналитическое исследование производных функции (4) для оценки границ регулирования на контрольной карте $P_{\max}$ при одностороннем ограничении [3]. Контроль по $P_{\max}$ при двустороннем ограничении поставил вопрос о необходимости исследования чувствительности контрольной карты $P_{\max}$ в области отклонений централизованного параметра, близких к нулю. В этой области наличие стабильной тенденции в изменении контролируемого параметра может снижать чувствительность карты к нестабильности технологического процесса.

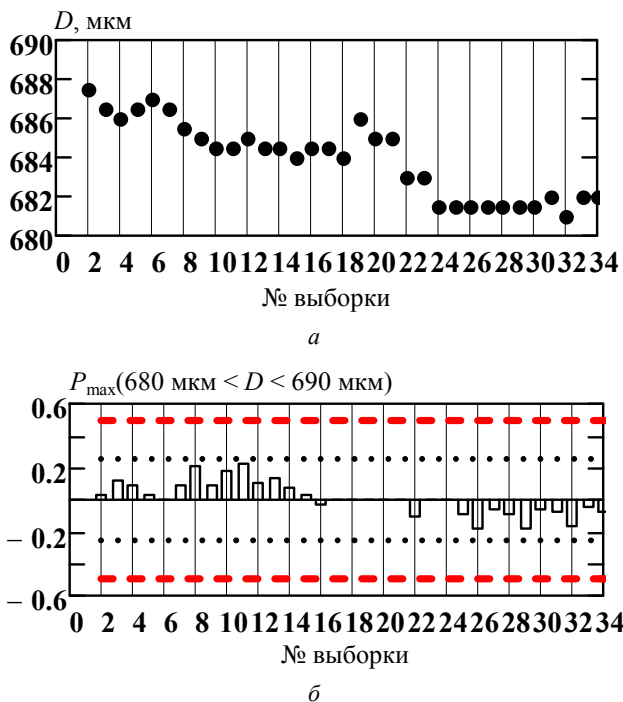


Рис. 1. Контроль диаметра D эмальпровода в непрерывном технологическом цикле по максимальной вероятности $P_{\max}$ выхода параметра за границы заданного двустороннего диапазона: а – результаты измерений D ; б – контрольная карта вероятности выхода параметра за границы диапазона (680 ... 690) мкм

Поскольку значение $[(AD_{i,2}AD_{i,2-1})]^2$ является квадратом наибольшего текущего изменения диаметра, эта величина в общем случае есть максимальная оценка дисперсии контролируемого параметра в текущей выборке $\underline{S}^2$. Соответственно, изменение знака на противоположный для вероятности выхода за нижнюю границу диапазона, значение $\inf[(AD_{i,2}AD_{i,2-1})]$ является квадратом наибольшего текущего изменения диаметра в сторону нижней границы заданного диапазона. То есть эта величина является максимальной оценкой дисперсии контролируемого параметра в текущей выборке при его изменении в сторону нижней границы $\underline{S}^2$. Обозначим текущие отклонения среднего значения параметра в выборке от верхней и нижней границ как $\underline{\alpha} \dots \bar{\alpha}$.

Тогда можно представить (2) как функцию четырех переменных:

$$\bar{\alpha} = \bar{E} - \frac{1}{2} \sum_{i=2-1}^{i:2} D; \underline{\alpha} = \underline{E} - \sum_{i=2-1}^{i:2} D, \quad (9)$$

$$P_{\max} = \frac{\bar{S}^2}{\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2} - \frac{\underline{S}^2}{\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2}. \quad (10)$$

Чувствительность $P_{\max}$ к изменению значений контролируемого параметра является полным дифференциалом (10). В случае взаимной независимости переменных, следующее выражение позволяет теоретически анализировать чувствительность $P_{\max}$ для двустороннего ограничения:

$$dPM = \frac{\partial P_{\max}}{\partial \bar{S}} + \frac{\partial P_{\max}}{\partial \bar{\alpha}} - \frac{\partial P_{\max}}{\partial \underline{S}} - \frac{\partial P_{\max}}{\partial \underline{\alpha}} = \frac{2 \cdot \bar{S} \cdot \bar{\alpha}^2 d\bar{S}}{(\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2)^2} - \frac{2 \cdot \bar{S} \cdot \bar{\alpha}^2 d\bar{\alpha}}{(\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2)^2} - \frac{2 \cdot \underline{S} \cdot \underline{\alpha}^2 d\underline{S}}{(\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2)^2} + \frac{2 \cdot \underline{S} \cdot \underline{\alpha}^2 d\underline{\alpha}}{(\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2)^2}. \quad (11)$$

Отдельно для верхнего и нижнего ограничений:

$$\frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{S}} + \frac{\partial \bar{P}}{\partial \bar{\alpha}} = \frac{2 \cdot \bar{S} \cdot \bar{\alpha}^2 d\bar{S}}{(\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2)^2} - \frac{2 \cdot \bar{S} \cdot \bar{\alpha}^2 d\bar{\alpha}}{(\bar{S}^2 + \bar{\alpha}^2)^2}, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{S}} + \frac{\partial \underline{P}}{\partial \underline{\alpha}} = \frac{2 \cdot \underline{S} \cdot \underline{\alpha}^2 d\underline{S}}{(\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2)^2} + \frac{2 \cdot \underline{S} \cdot \underline{\alpha}^2 d\underline{\alpha}}{(\underline{S}^2 + \underline{\alpha}^2)^2}. \quad (13)$$

Выводы.

Максимальная чувствительность контрольной карты $P_{\max}$ имеет место при вполне определенных соотношениях переменных в пределах установленных границ. За пределами этих границ контроль по $P_{\max}$ не эффективен. Поэтому в конкретных задачах текущего контроля кабельно-проводниковой продукции использование технических допусков для контролируемого параметра нецелесообразно. Контроль по $P_{\max}$ должен быть направлен на исключение изготовления продукции (например, эмальпроводов), параметры которой выходят за пределы технических допусков.

Следовательно, для достижения максимальной чувствительности контроля технологические границы, во-первых, должны быть выбраны исходя из достигнутого уровня среднего значения параметра и его статистического рассеяния.

Во-вторых, технологические границы необходимо изменять в соответствии с достигнутым уровнем среднего значения параметра и его статистического рассеяния. Такое изменение может служить количественным показателем тенденции повышения либо снижения надежности данной технологической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щепенюк Л.А., Голик О.В. Математичні основи надійності ізоляції електрообладнання: Навч.-метод. посібник. – Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – 102 с.
2. Кузнецов В.П. Интервальные статистические модели. М.: Радио и связь. 1991. – 352 с.
3. Карпушенко В.П., Щепенюк Л.А., Антоненко Ю.О., Науменко О.А. Контрольная карта – інструмент якості кабельної продукції // Силові кабелі низької та середньої напруги. Конструювання, технологія, якість. Харків: Регіон-Інформ, 2000. – С. 270-289.
4. Щепенюк Л.А., Голик О.В. Методика построения контрольной карты вероятности выхода признака за нормативный предел // Вестник Харьковского государственного политехнического университета. – 2000. – №127. – С. 35-38.
5. Голик О.В. Метод оперативного контроля параметров двухслойной полиимидной изоляции эмальпровода в процессе производства: дисс. ... канд. техн. наук. – Харьков, 2009. – 168 с.

REFERENCES

1. Shchebeniuk L.A., Golik O.V. *Matematychni osnovy nadiynosti izolyatsiyi elektroobladnannya* [Mathematical

- foundations of the reliability of electrical insulation]. Kharkiv, NTU «KhPI» Publ., 2003. 102 p. (Ukr).
2. Kuznetsov V.P. *Interval'nye statisticheskie modeli* [Interval statistical models]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1991. 352 p. (Rus).
 3. Karpushenko V.P., Shchebeniuk L.A., Antonets Y.O., Naumenko O.A. Control card – instrument of quality of cable products. *Power cables of low and medium voltage. Design, technology, quality*. Kharkiv, Region-Inform Publ., 2000. pp. 270-289. (Ukr).
 4. Shchebeniuk L.A., Golik O.V. A method of constructing control charts the probability of an exit sign beyond the regulatory limit. *Bulletin of Kharkiv State Polytechnic University*, 2000, no.127, pp. 35-38. (Rus).
 5. Golik O.V. *Metod operativnogo kontroliu parametrov dvukhsloinnoi poliimidnoi izoliatsii emal'provoda v protsesse proizvodstva*. Diss. cand. techn. nauk [Method of controlling parameters of a two-layer polyimide insulation enameled wire in the production process. Cand. tech. sci. diss.]. Kharkov, 2009, 168 p. (Rus).

Поступила (received) 29.04.2016

Голік Оксана Вячеславовна, к.т.н., доц.,
Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 21,
тел/phone +380 57 7076010, e-mail: unona928@gmail.com

O.V. Golik
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
21, Kyrpychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

Statistical procedures for two-sided limit of a controlled parameter in the process of production of cable and wire products.

Purpose. To consider issues of statistical control in the process of mass production of cable and wire products on the example of

enameled wire. To analyze the results of direct control of the diameter of the wire in two-layer polyimide insulation in a continuous technological cycle. To submit to the control map of maximum probability of the exit diameter outside a specific range. To analyze the conditions under which maximum sensitivity of process control. **Methodology.** Study of the sensitivity of the control map of maximum probability of the exit option for regulatory of limit in the field deviations of the centered parameter close to zero. The existence of stable trends in the change of a controlled parameter can reduce the sensitivity of punishment to instability of the process. **Results.** To achieve maximum sensitivity of control of the technological frontier should be selected on the basis of the achieved level of the average value of the parameter and its statistical scattering. Process boundaries must be changed in accordance with the achieved level of the average value of the parameter and its statistical scattering. Such a change may serve as a quantitative indicator of trends in the increase or decrease in the reliability of the technological system. **Originality.** In particular the tasks of current control using engineering tolerances for controlled parameter are impractical. Control on $P_{\max}$ should be directed to the exception of manufacturing, the parameters of which extend beyond the technical tolerances. **Practical value.** The exception is the manufacture of bulk cable products, the parameters of which extend beyond the technical tolerances. References 5, figures 1.

Key words: enameled wire, double polyimide insulation, control card, maximum probability of the parameter exit for the regulatory limit.