

А.В. Беспрозванных, А.В. Рогинский

МОНИТОРИНГ СТАБИЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Показано, що опір ізоляції можливо застосовувати в якості інформативного параметру стабільності технологічного процесу виготовлення електроізоляційних систем тягових електричних машин. Встановлено, що опір ізоляції знаходиться в межах $\pm 3\sigma$ відносно середнього значення кожної вибірки трьох варіантів виконання електроізоляційної системи. Представлено контрольні карти індивідуальних значень та кумулятивних сум опору ізоляції магнітної системи тягових електродвигунів постійного струму. Бібл. 8, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: тягові електричні машини, електроізоляційні системи, опір ізоляції, контрольні карти кумулятивних сум, стабільність технологічного процесу.

Показано, что сопротивление изоляции может служить информативным параметром стабильности технологического процесса изготовления электроизоляционных систем тяговых электрических машин. Установлено, что сопротивление изоляции находится в пределах $\pm 3\sigma$ относительно среднего значения каждой выборки трех вариантов исполнения электроизоляционной системы. Представлены контрольные карты индивидуальных значений и кумулятивных сум сопротивления изоляции магнитной системы тяговых электродвигателей постоянного тока. Библ. 8, табл. 1, рис. 4.

Ключевые слова: тяговые электрические машины, электроизоляционные системы, сопротивление изоляции, контрольные карты кумулятивных сум, стабильность технологического процесса.

Введение. Электроизоляционные системы составляют примерно 0,03 % от массы тяговых электрических машин (ТЭМ), но имеют исключительную важность и влияют на возможности конструкторских решений и технологии изготовления электрических машин, в итоге – на их удельную массу и габаритные размеры, на надёжность и долговечность ТЭМ. Совершенствование электроизоляционных композитных систем ТЭМ осуществляется путем создания новых, более прогрессивных, материалов и технологических процессов [1].

Сопротивление изоляции – интегральный показатель стабильности технологического процесса. Мониторинг качества продукции в процессе ее производства всегда остро стоит перед производителями. В условиях современного производства используются методики и процедуры, основанные на статистическом анализе характеристик изделий [2-4]. Количественно точность технологических процессов оценивается с использованием коэффициента

$$K_T = \frac{6\sigma}{T},$$

где $T = T_{up} - T_{lower}$ – допуск изделия по контролируемому параметру (разность между верхним и нижним значением), σ – среднее квадратическое отклонение контролируемой величины.

Точность технологического процесса оценивают исходя из следующих критериев:

- при $K_T \leq 0,75$ – технологический процесс точный;
- при $K_T = (0,75 - 0,98)$ – требует внимательного наблюдения;
- при $K_T > 0,98$ – неудовлетворительный.

Критерием оценки состояния электроизоляционных систем на производстве является величина сопротивления изоляции R_{ins} . Это значение указывается в нормативно-технической документации [5]. Так, для высоковольтных электроизоляционных систем ТЭМ

сопротивление изоляции R_{ins} относительно корпуса (нижнее пороговое значение) должно быть не менее 20 МОм в холодном состоянии для машин с номинальным напряжением свыше 400 В. Верхнее значение сопротивления изоляции не регламентируется. Сопротивление изоляции является интегральной статистической характеристикой, которая зависит, прежде всего, от электрофизических свойств композитной системы, и технологического процесса изготовления сборочных единиц и самой ТЭМ в целом. Следует отметить, что особенностью технологического процесса изготовления изоляционных систем ТЭМ является высокий уровень немеханизированного (ручного) производства.

Целью статьи является мониторинг стабильности технологического процесса изготовления электроизоляционных систем ТЭМ по результатам измерений сопротивления изоляции на производстве.

Мониторинг стабильности технологического процесса по контрольным картам индивидуальных значений. Анализ технологического процесса выполнен для трех вариантов корпусной изоляции магнитной системы тягового электродвигателя постоянного тока. В каждом из трех вариантов корпусной изоляции – по 12 образцов, отличающихся числом слоев и типом изоляционных лент. Измерения сопротивления изоляции выполнены тераомметром MI 2077 при постоянном напряжении 2500 В.

На рис. 1,а представлены результаты измерений, а на рис. 1,б – статистические характеристики сопротивления изоляции трех вариантов корпусной изоляции. Статистический разброс измеренных значений сопротивления изоляции (рис. 1,б) в пределах каждого варианта изоляционной системы связан, по крайней мере, с двумя причинами [6]. Первая обусловлена неизбежными случайными погрешностями измерений

и невозможностью абсолютно точного воспроизведения условий испытаний. Вторая причина – более глубокая и состоит в том, что сопротивление изоляции отображает имеющиеся структурные и технологические дефекты в изоляционной системе, и связана с неоднородностью материала изоляции, технологическим оборудованием, квалификацией персонала.

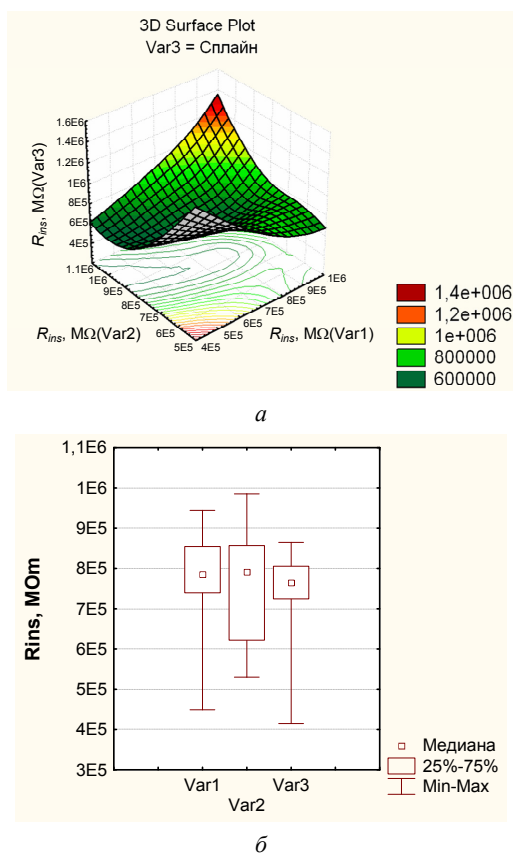


Рис. 1. Выборки сопротивления изоляции трех вариантов корпусной изоляционной системы

Для всех трех вариантов сопротивление изоляции лежит в пределах $\pm 3\sigma$ относительно номинального (среднего) значения для каждой выборки (рис. 2), что соответствует концепции «Шесть сигм» [7].

В условиях производственного процесса одним из основных инструментов мониторинга являются контрольные карты (или контрольные карты Шухарта), визуализирующие статистические характеристики исследуемого технологического процесса [4, 8]. Контрольные карты индивидуальных значений (рис. 3) позволяют обнаружить отклонения (X) или скользящего размаха (MR) сопротивления изоляции, которые обусловлены неслучайными причинами.

При использовании карт индивидуальных значений контрольные границы рассчитывают на основе меры вариации, полученной по скользящим размахам обычно двух наблюдений. Скользящий размах (MR) представляет собой абсолютное значение разности измерений в последовательных парах (разность первого и второго измерений, второго и третьего и т.д.).

На основе скользящих размахов вычисляют средний скользящий размах, который используют для построения контрольных карт. Нижняя и верхняя границы на карте (рис. 3, штрихпунктирные линии) нахо-

дятся на расстоянии 3σ от среднего значения (центральная линия). При этом не наблюдается ни систематических смещений (трендов), ни каких-либо других признаков выхода процесса из-под контроля: точки обеих карт равномерно (на основе визуального анализа) колеблются относительно соответствующих средних линий. Точки на обеих контрольных картах находятся внутри контрольных пределов. Значение второго измерения находится достаточно близко к нижнему контрольному пределу, однако на фоне общей положительной картины это не является тревожным событием.

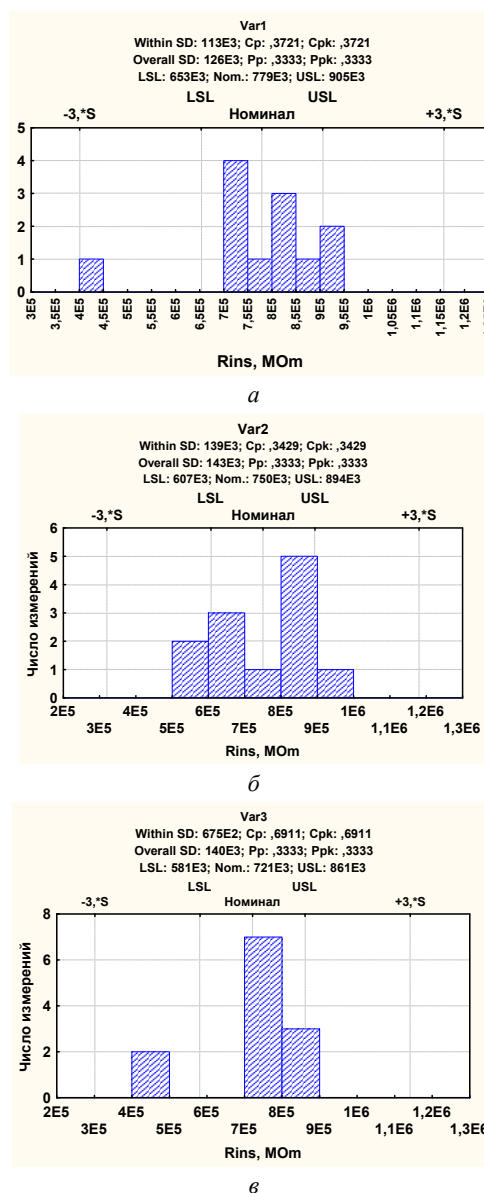


Рис. 2. К однородности выборок сопротивления изоляции

Для задания критериев поиска серий точек область индивидуальной контрольной карты над центральной линией и под ней делится на три «зоны»: А, В и С [4]. По умолчанию зона А определяется как область, расположенная на расстоянии от 2σ до 3σ по обе стороны от центральной линии. Зона В – область, отстоящая от центральной линии на расстоянии от 1σ до 2σ , а зона С – как область, расположенная между центральной линией по обе ее стороны и огра-

ниченная прямой, проведенной на расстоянии $1 \cdot \sigma$ от центральной линии.

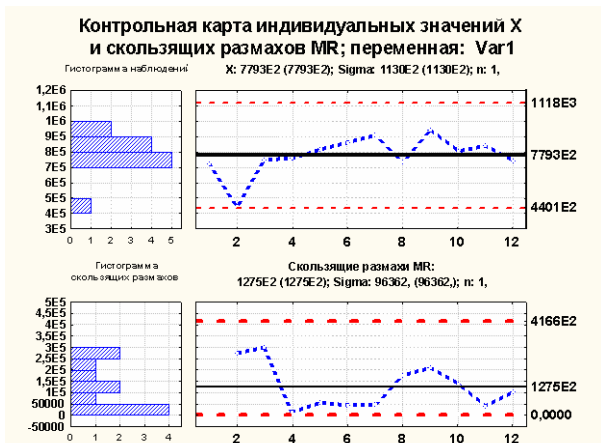


Рис. 3. Контрольная карта индивидуальных значений сопротивления изоляции и скользящих размахов для варианта 1 корпусной изоляционной системы

В зависимости от количества точек и их расположения в одной из зон контрольной карты, установлено семь критериев.

При выполнении того или иного критерия в таблице результатов тестирования строка, соответствующая этому критерию, выделяется красным цветом, а вместо ОК в столбцах указываются номера точек, попавших в зону риска (табл. 1).

Результаты тестирования (табл. 1), выполненные для MR- контрольной карты (рис. 3) и для двух других вариантов корпусной изоляции, показывают, что по всем критериям тестирования технологического процесса по сопротивлению изоляции исследуемые показатели находятся в статистически управляемом состоянии. Сигнала о необходимости принятия мер предупреждающего характера не обнаружено.

Таблица 1

Результаты тестирования стабильности технологического процесса

Зоны A/B/C: (3,0/2,0/1,0)* σ	Переменная var1 MR-карта Центральная линия 127545,45 МОм, $\sigma = 96361,95$ МОм	
	от выборки	к выборке
9 точек с одной стороны от центральной линии	ОК	ОК
6 точек роста/ снижения	ОК	ОК
14 точек чередуются вверх и вниз	ОК	ОК
2 из 3-х точек в зоне А или за ее пределами	ОК	ОК
4 из 5-ти точек в зоне В или за ее пределами	ОК	ОК
15 точек в зоне С	ОК	ОК
8 точек за пределами зоны С	ОК	ОК

Большой чувствительностью к возмущениям технологического процесса обладают контрольные карты кумулятивных сумм (CuSum) [4] (рис. 4), которые представляют накопленные суммы отклонений отдельных значений наблюдаемой переменной (сопротивления изоляции) от среднего значения.

На рис. 4 приведены контрольные карты кумулятивных (накопленных) сумм для трех вариантов корпусной изоляции. Для двенадцатого CuSum наблюдения (рис. 4,б) отмечается выход за нижнюю границу и для одиннадцатого – за верхнюю для MR, что может служить признаком начавшейся разладки технологического процесса. При этом для этого варианта проясляется также тренд выборочных значений CuSum, что требует выяснения причин его появления.

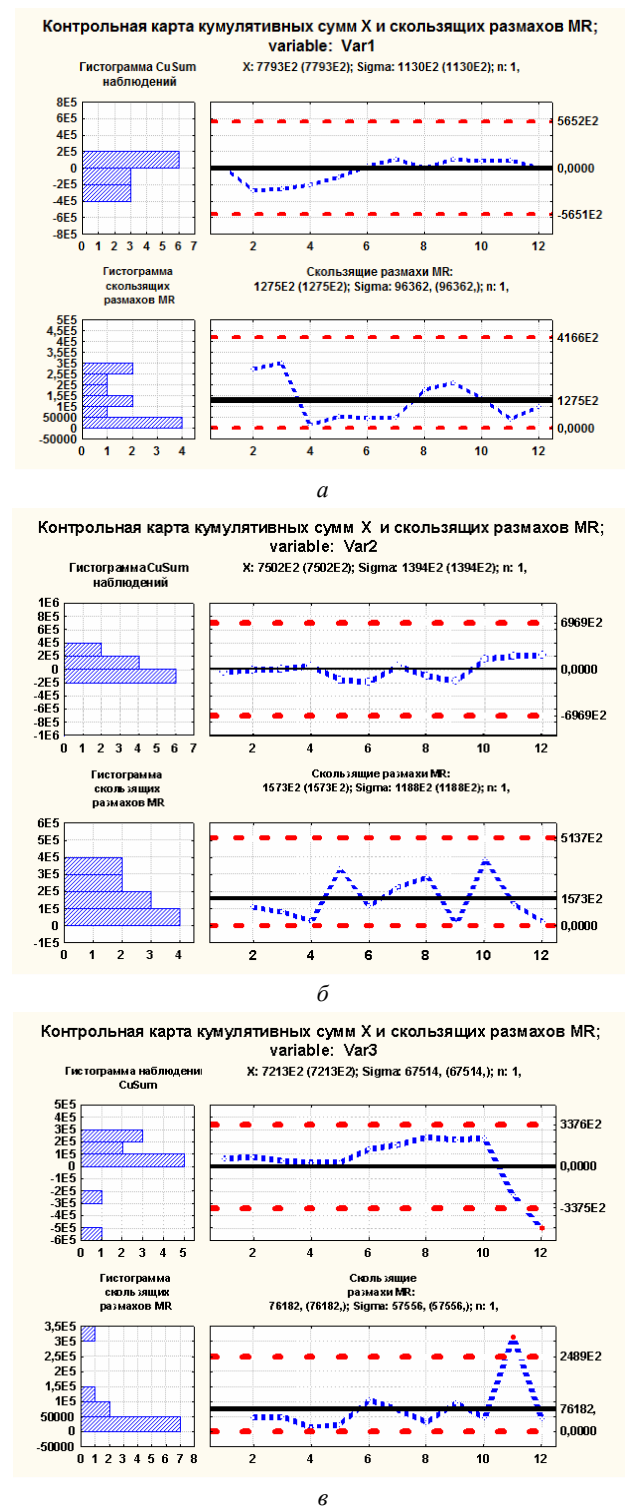


Рис. 4. Контрольные карты кумулятивных сумм и скользящих размахов сопротивления изоляции трех вариантов корпусной изоляционной системы

Выводы. Построение и анализ специальных графиков (карт) индивидуальных значений и кумулятивных сумм сопротивления изоляции, скользящего размаха *MR* позволяют выяснить, находится ли технологический процесс изготовления электроизоляционных систем тяговых электрических машин в статистически управляемом состоянии.

Представленная процедура мониторинга может использоваться для анализа стабильности технологических процессов изготовления электроизоляционных систем турбо- и гидрогенераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электроизоляционные материалы и системы изоляции для электрических машин. В двух книгах. Кн. 2 / В.Г. Огоньков и др.; под ред. В.Г. Огонькова, С.В. Серебрянникова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 304 с.
2. Хартман К., Лецкий Э., Шефер В. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
3. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Множественная регрессия. Applied Regression Analysis. – 3-е изд. – М.: «Диалектика», 2007. – 912 с.
4. ISO 7870-4:2011. Cumulative sum charts – Guidance on quality control and data analysis using CUSUM techniques.
5. ГОСТ 2582-2013. Машины электрические вращающиеся тяговые. Общие технические условия. – Введ. 2015-01-01. – М.: Стандартинформ, 2014. – 56с.
6. Безпрозванных А.В., Москвитин Е.С. Число двойных перегибов как индикатор степени старения кабельных бумаг // *Электротехника і електромеханіка*. – 2011. – №3. – С. 62-66. doi: 10.20998/2074-272X.2011.3.16.
7. Eckes G. Six Sigma Team Dynamics: The Elusive Key to Project Success. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. – 262 p.
8. Золотарев В.М., Антонен Ю.А., Гури А.Г., Шебенюк Л.А., Голик О.В. Исследование корреляции электрических и механических параметров двойной изоляции эмальпроводов // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – №2. – С. 78-80.

REFERENCES

1. Ogonkov V.G., Serebryannikov S.V. *Elektroizoliatsionnye materialy i sistemy izoliatsii dlia elektricheskikh mashin. V dvukh knigakh. Kn. 2* [Electrical insulation materials and insulation systems for electrical machines. In 2 books. Book 2]. Moscow, Publishing house MEI, 2012. 304 p. (Rus).
2. Hartman K., Letsky E., Shefer V. *Planirovanie eksperimenta v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov* [Planning an experiment in the study of technological processes]. Moscow, Mir Publ., 1977. 552 p. (Rus).
3. Draper N., Smith H. *Prikladnoi regressiionnyi analiz. Mnozhestvennaia regressiia. Applied Regression Analysis* [Applied regression analysis. Multiple regression. Applied Regression Analysis. 3rd ed.]. Moscow, Dialectics Publ., 2007. 912 p. (Rus).
4. ISO 7870-4:2011. *Cumulative sum charts – Guidance on quality control and data analysis using CUSUM techniques*.

5. GOST 2582-2013. *Mashiny elektricheskie vrashchayushchiesia tiagovye. Obshchie tekhnicheskie usloviia* [State Standart 2582-2013. Electric rotating traction machines. General specifications]. Moscow, Standardinform Publ., 2014. 56 p. (Rus).
6. Bezprozvannykh A.V., Moskvitin E.S. Double-kink number as an indicator of degree of cable paper ageing. *Electrical engineering & electromechanics*, 2011, no.3, pp. 62-66. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2011.3.16.
7. Eckes G. *Six Sigma Team Dynamics: The Elusive Key to Project Success*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003. 262 p.
8. Zolotarev V.M., Antonets Yu.A., Gurin A.G., Shebenyuk L.A., Golik O.V. Investigation of the correlation of electrical and mechanical parameters of double insulation of enamel wires. *Electrical engineering & Electromechanics*, 2005, no.2, pp. 78-80. (Rus).

Поступила (received) 09.10.2017

Безпрозванных Анна Викторовна¹, д.т.н., проф.,
Рогинский Александр Владимирович², аспирант,

¹Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»,
61002, Харьков, ул. Кирпичева, 2,
тел/phone +380 57 7076010,
e-mail: bezprozvannykh@kpi.kharkov.ua

²Государственное предприятие «Завод «Электротяжмаш»,
61089, Харьков, Московский проспект, 299б,
тел/phone +380 50 5158552 49,
e-mail: roginский.av.@gmail.com

G.V. Bezprozvannykh¹, A.V. Roginsky²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,
2, Kyrychova Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²SE Plant Electrotyazhmash,
299, Moskovsky Ave., Kharkiv, 61089, Ukraine.

The stability monitoring of the manufacturing process of electrical insulating systems of traction electric machines.

Introduction. Electrical insulation systems make up about 0.03 % of the traction electric machines (TEM) mass, but they are of exceptional importance and affect the design capabilities and manufacturing techniques of electric machines, ultimately - on their specific weight and overall dimensions, on the reliability and durability of the TEM. **Purpose.** The monitoring of the stability of the manufacturing process of electrical insulating systems of the TEM based on the insulation resistance measurements. **Methodology.** The analysis of the manufacturing process is carried out for three versions of the case of insulation of the magnetic system of the DC traction electric motor. **Practical value.** Construction and analysis of special graphs (charts) of individual values and cumulative sums of insulation resistance, sliding range *MR* allow to find out whether the technological process of manufacturing electric insulating systems of traction electric machines is in a statistically controllable state. References 11, tables 1, figures 4.

Key words: traction electrical machines, electrical insulation systems, insulation resistance, cumulative sum control chart, manufacturing process stability.