

Определение основного структурного параметра электрического контактного соединения в составе электротехнического комплекса

Н. М. Косьянов

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

nikmaniwe@gmail.com

Аннотация. Представлено теоретическое обоснование нового метода определения состояния электрических контактных соединений в составе электротехнического комплекса с учетом возможных действующих факторов, приводящих к снижению качества и надежности таких соединений. Новый метод позволяет определить состояние электрических контактных соединений, которое будет учитывать все известные диагностические признаки и взаимосвязь между ними. Полученные данные позволят сформировать нормативную базу для составления заключений о состоянии электрических контактных соединений по результатам диагностики, а также обосновать технические параметры, которые должны учитываться при проектировании новых соединений.

Ключевые слова: диагностика, способ диагностики, определение состояния, электрическое соединение, контактное соединение

Для цитирования: Косьянов Н. М. Определение основного структурного параметра электрического контактного соединения в составе электротехнического комплекса // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2023. Т. 16, № 8. С. 81–86. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-81-86.

Original article

Determination of the Main Structural Parameter of the Diagnostic System of an Electrical Contact Connection as Part of an Electrotechnical System

N. M. Kosyanov

Saint Petersburg Electrotechnical University, Saint Petersburg, Russia

nikmaniwe@gmail.com

Abstract. A theoretical substantiation for a new method for determining the state of electrical contact connections as part of an electrical complex is proposed. The influence of possible operating factors leading to a decrease in the quality and reliability of such connections is considered. The proposed method takes into account all known diagnostic features and the relationship between them. The data obtained create a regulatory framework for assessing the state of electrical contact connections based on the results of diagnostics, as well as for determining the technical parameters when designing new connections.

Keywords: diagnostics, diagnostic method, condition assessment, electrical connection, contact connection

For citation: Kosyanov N. M. Determination of the Main Structural Parameter of the Diagnostic System of an Electrical Contact Connection as Part of an Electrotechnical System // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2023. Vol. 16, no. 8. P. 81–86. doi: 10.32603/2071-8985-2023-16-8-81-86.

Введение. Электрическое контактное соединение (ЭКС) – это физическое соединение между двумя или более проводниками, которое обеспечивает электрическую связь между ними. ЭКС

позволяет передавать электрический ток от одного проводника к другому и, будучи элементом электротехнического комплекса, должно отвечать стандартам безопасности, надежности и энер-

гоэффективности. Важными характеристиками ЭКС, определяющими его состояние, служат механическая прочность, устойчивость к окислению, коррозии и переходное электрическое сопротивление, которое позволяет минимизировать потери энергии в системе. Существенное влияние на ЭКС оказывает электродинамическое взаимодействие протекающих токов, из чего следует выделение джоулева тепла в контактной области. При пусковых или пульсирующих токах повышение температуры в контактной области может привести к изменению свойств материалов контакта, вызывая плавление, деформацию или окисление. Это становится причиной снижения качества ЭКС и ухудшения электрической связи.

Помимо этого известно, что при воздействии внешних и внутренних вибраций на ЭКС, через которое протекает переменный ток, в системе возникают дополнительные гармоники тока. Результат этих факторов заключается в изменении прижимного усилия контактов и уменьшении площади контакта, а следовательно, в увеличении контактного сопротивления и ухудшении качества электрической энергии в системе.

Правильное определение состояния ЭКС позволяет выявить потенциальные проблемы и принять меры по их устранению, обеспечивая надежную работу оборудования электротехнического комплекса. Существующие методы диагностики рассматривают только один из вышеперечисленных факторов, влияющих на изменение состояния ЭКС. Новый способ учитывает все диагностические признаки и определяет полное техническое состояние ЭКС в процессе эксплуатации.

Постановка задачи. В настоящей статье приводится теоретическое обоснование такого способа определения состояния ЭКС, который основывается на проведение анализа гармонических составляющих тока, протекающих через ЭКС. Для выполнения поставленной задачи выделен общий диагностический структурный параметр, зависящий исключительно от параметров структуры ЭКС и условий его эксплуатации. По изменению значений выделенного параметра можно судить как о качестве вводимого в эксплуатацию ЭКС, так и о возникающих в процессе его эксплуатации дефектах структуры, а также о недопустимых эксплуатационных условиях.

Основной структурный параметр. Рассматриваются токопроводящие элементы в виде двух одинаковых цилиндрических проводников, причем контакт между ними происходит вдоль оси

по круглой площадке. Переходная область контакта подвергается геометрическим изменениям в зависимости от прижимного усилия, в результате чего вблизи области контакта можно выделить три зоны: нормального протекания тока, распределения тока и стягивания. Переходное сопротивление контакта R_k превышает по своему значению сопротивление зоны нормального протекания тока R_n . Для установления относительной оценки переходного сопротивления достаточно рассмотреть такое сопротивление при одноточечном контакте, поскольку при многоточечных контактах и при сохранении прежних геометрических параметров общее сопротивление уменьшается в несколько раз, пропорционально количеству одноточечных контактов в контактном соединении [1]. Для одноточечного контакта с размером контактного пятна a и удельном электрическом сопротивлении материала ρ переходное контактное сопротивление при условиях упругого деформирования можно определить из

$$R_k = \frac{\rho}{2a}.$$

При этих же условиях сопротивление зоны нормального протекания тока по участку аналогичной длины с радиусом проводника R_c определяется из уравнения

$$R_n = \frac{3\rho}{2\pi R_c}.$$

Размер контактного пятна a определяется значениями прижимного усилия, температурой контактной области и характеристикой обработки поверхности и, следовательно, является функцией от этих параметров. Поэтому в качестве аналога для любого типа проводника рассматривается безразмерный структурный параметр ЭКС γ , учитывающий все перечисленные зависимости:

$$\gamma = a/R_c. \quad (1)$$

Согласно ГОСТ 10434–82 значение переходного контактного сопротивления ЭКС цепей с электротехническими устройствами не должна превышать более чем в 6 раз значение сопротивления зоны нормального протекания тока по участку аналогичной длины. Следовательно, для отношения соответствующих сопротивлений справедливо

$$\frac{R_k}{R_n} = \frac{\rho/(2a)}{3\rho/(2\pi R_c)} = \frac{\pi}{3} \gamma^{-1} < 6.$$

Откуда для выполнения условия значение структурного параметра γ должно быть больше 0.1745 или, иными словами, размер контактного пятна должен быть не менее 17.45 % от радиуса контактирующих проводников.

Имея определение размера контактной поверхности $a = \left(\frac{3R_c P}{2E}\right)^{1/3}$ [2], для (1) справедливо

$$\gamma = \frac{\left(\frac{3R_c P}{2E}\right)^{1/3}}{R_c} = \left(\frac{3P}{2E}\right)^{1/3} \left(\frac{1}{R_c}\right)^{2/3} > 0.1745, \quad (2)$$

где E – модуль упругости контактирующего материала; P – действующее сжимающее контакт усилие. Полученное выражение может быть использовано на этапе проектирования ЭКС, поскольку, исходя из выбора материала E и размера R_c токопроводящих элементов и с учетом минимального значения структурного параметра, рассчитывается исходное сжимающее контакт усилие P_0 .

Известно [3], что под воздействием вибрации ЭКС, вызванной электродинамическим взаимодействием протекающих токов, исходное прижимное контактное усилие P_0 изменяется со временем по закону в соответствии с частотой вибрационных колебаний в ЭКС:

$$P(t) = P_0 + \Delta P \cos(\omega_p t - \varphi_p), \quad (3)$$

где ω_p – частота колебаний; φ_p – начальная фаза возмущения.

Для (3) известно определение изменения такого прижимного усилия [4]:

$$\Delta P = 1.02 \cdot 10^{-8} I^2 \ln \frac{1}{\gamma},$$

или для γ :

$$\gamma = e^{-\frac{1.02 \cdot 10^{-8} I^2}{P_0} \left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)^{-1}} > 0.1745, \quad (4)$$

где I – ток от источника, протекающий в цепи и представленный в виде

$$I(t) = \sum I_j \cos(\omega_j t - \varphi_{j}). \quad (5)$$

Здесь I_j – ток, порождаемый j -й гармоникой падения напряжения на ЭКС; ω_j – частота колебания соответствующей составляющей; φ_{j} – начальная фаза возмущения соответствующей составляющей.

В процессе эксплуатации ЭКС, находящегося под воздействием вибрации, происходит изменение гармонического состава тока согласно (5), который протекает через соединение. Это оказывает непосредственное влияние на функционирование ЭКС и изменение прижимного усилия, что описывается уравнениями:

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= P_0^\sigma + P_0^\sigma \left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)^2 \frac{1}{4} \sigma(1-\sigma), \\ \varphi_{I_0} &; \\ i_1 &= P_0^\sigma \frac{\Delta P}{P_0} \left(\sigma - \frac{\Delta P}{P_0} \frac{1}{8} \sigma(1-\sigma)(2-\sigma)\right), \\ \varphi_{I_1} &= \varphi_p; \\ i_2 &= \frac{1}{2^4} (P_0)^\sigma \left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)^2 \frac{\sigma(1-\sigma)}{1+2} \prod_{s=1}^2 \frac{|s+1-\sigma|}{s}, \\ \varphi_{I_2} &= 2\varphi_p; \\ i_3 &= -(P_0)^\sigma \frac{\sigma}{2^6} \left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)^6 (1-\sigma) \prod_{s=1}^3 \frac{|1+s-\sigma|}{s}, \\ \varphi_{I_3} &= 3\varphi_p, \end{aligned} \right\} (6)$$

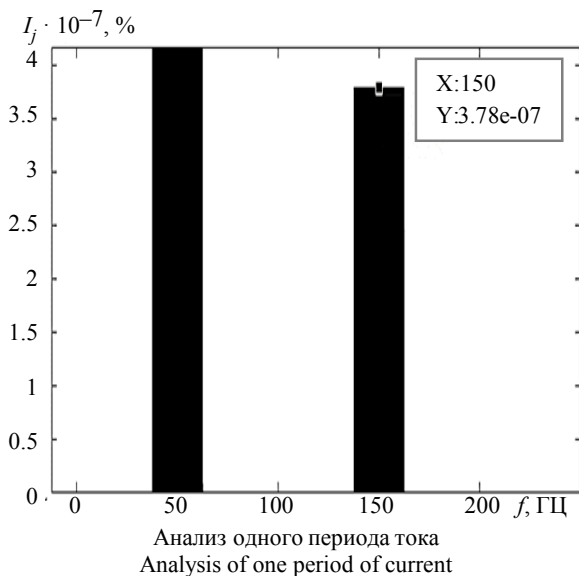
где i_0, i_1, i_2, i_3 – мгновенные значения соответствующих гармоник тока; $\varphi_{I_0}, \varphi_{I_1}, \varphi_{I_2}, \varphi_{I_3}$ – начальные фазы возмущения соответствующих гармоник; σ – показатель, определяющий отклонения от упругой модели Герца ($0.3 < \sigma \leq 0.7$; при рассмотрении упругой модели деформации $\sigma = 1/3$), $s = 1, 2$ для второй гармоники и $s = 1, 2, 3$ для третьей. Причем дополнительные гармоники характеризуются появлением на трехкратной частоте относительно основной гармоники. Таким образом, общий вид для протекающего через ЭКС тока для первых четырех гармоник с учетом упругой модели деформации представляется в виде

$$\begin{aligned} I(t) &= I_{\text{amp}} \left(i_0 + \frac{1}{2} i_1 + \frac{1}{2} i_2 + \frac{1}{2} i_3 \right) = \\ &= I_{\text{amp}} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{337}{7776} \left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)^2 - \frac{55}{11664} \left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)^6 \right), \quad (7) \end{aligned}$$

где I_{amp} – амплитудное значение тока, протекающего через ЭКС, при отсутствии вибрации. Наибольшей зависимостью от прижимного усилия P обладают первые четыре гармоники тока. Если прижимное усилие уменьшается в два раза, то суммарная амплитуда составляющих гармоник может измениться более чем на 10 % от амплитуды тока, проходящего через контакт без вибра-

ции. Высшие гармоники вносят незначительный вклад при изменении прижимного усилия по сравнению с первыми гармониками. Поэтому для определения гармонического изменения тока, вызванного вибрацией в ЭКС, достаточно рассмотреть изменения первых четырех гармоник.

Способ диагностики. Новый способ диагностики рассматривается в рамках создания лабораторного стенда для исследования процессов, возникающих при эксплуатации ЭКС. Он заключается в регистрации получаемых гармонических составляющих тока, протекающих через ЭКС, с помощью осциллографа с функцией быстрого преобразования Фурье (БПФ). Для рассматриваемой системы, состоящей из токопроводящих элементов с медной жилой наиболее распространенного типа, используемых в трехфазных системах для подключения электротехнических устройств, при проектировании ЭКС с помощью уравнения (2) вычисляется исходное значение прижимного контактного усилия P_0 , значение которого должно быть не менее 112.82 Н. Получаемый при такой конфигурации системы анализ протекающего тока за некоторый промежуток эксплуатации ЭКС представлен на рисунке.



Анализ демонстрирует появление дополнительных гармоник на трехкратной частоте основного сигнала в 50 Гц. Основной вклад в общее амплитудное значение гармонических составляющих на искомой частоте 150 Гц имеют первые четыре дополнительные гармоники тока. Необходимо учитывать, что результат быстрого преобразования Фурье выводится в процентом отношении относительно суммарной величины протека-

ющего тока. При помощи математических преобразований с помощью дополнительного программного обеспечения с возможностью технических вычислений, например MatLab, из системы уравнений для первых четырех гармоник (6)

определяется отношение $\frac{\Delta P}{P_0}$, характеризующее

изменения прижимного усилия в ЭКС. Ниже приводится пример такого программного кода, результатом вычисления которого служит значение искомого отношения:

```

syms  $\frac{\Delta P}{P_0}$ 
eq =  $\frac{1}{6} \frac{\Delta P}{P_0} + \frac{337}{7776} \left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)^2 - \frac{55}{11664} \left(\frac{\Delta P}{P_0}\right)^6 =$ 
= 0.000000003783 * 2
Res = vpa (solve (eq,  $\frac{\Delta P}{P_0}$ ))
Res = 0.000000045395999756315273797303185290892.

```

Уравнение eq – это программное представление уравнения действующего значения тока (7) с учетом имеющихся исходных данных об ЭКС. Величина Res, представляющая собой отношение

$\frac{\Delta P}{P_0}$, характеризует изменения, произошедшие в

процессе эксплуатации ЭКС, причем при идеальных условиях эксплуатации справедливо $\frac{\Delta P}{P_0} \rightarrow 0$. С целью достижения наибольшей точ-

ности расчетов необходимо настроить представление результатов с наибольшим количеством значений после запятой без округлений. Полученное значение используется для определения величины основного структурного параметра путем вычислений на основании (4):

```

syms  $P_0$ 
syms  $\gamma$ 
syms  $I$ 
eq1 = Res *  $P_0 = 1.02 \cdot 10^{-8} \cdot I^2 \cdot \log(1/\gamma)$ 
solve (eq1,  $\gamma$ )
 $\gamma = 0.17549418$ 

```

Таким образом, для рассматриваемой системы основной структурный параметр составляет 0.1755, что выше нормативного порогового зна-

чения 0.1745, и, следовательно, может быть сделано заключение о нормальном состоянии ЭКС в данный момент времени и необходимости проведения повторных замеров через некоторый промежуток времени в рамках эксплуатации.

Рассмотрим случай увеличения на 5 % напряжения источника, к которому подключена эта же система, имеющая ЭКС. При таких условиях анализ основного структурного параметра в момент изменения напряжения составит 0.1744, что ниже нормативного значения. Проведение каждого анализа ЭКС должно фиксироваться в журнале замеров (см. таблицу), данные из которого позволят изучить тенденции и построить график отслеживания изменений основного структурного параметра в рамках эксплуатации.

Шаблон журнала замеров
Measurement log template

Номер итерации	Результат γ	Дата замеров	Комментарии
1	0.175500	—	Проектное значение
2	0.175494	21.05.23 8:00	Нормальная эксплуатация
3	0.174432	21.05.23 8:10	Прекращение эксплуатации
...

Следовательно, при определении проектного значения структурного параметра необходимо закладывать дополнительный запас прочности по основному структурному параметру с учетом возможных аварийных и внештатных событий в системе. В случае получения результатов об уменьшении основного структурного параметра ниже порогового значения в зависимости от сте-

пени отклонения должно быть сделано заключение о приостановке эксплуатации ЭКС и проведения ремонтных работ. При отсутствии наблюдаемых на поверхности ЭКС воздействий сторонних факторов, например влияния окружающей среды, и подтверждении технической возможности дальнейшей эксплуатации ЭКС значение прижимного контактного усилия должно быть восстановлено до исходного либо на необходимую величину, вычисляемую из рассчитанных данных отношения $\frac{\Delta P}{P_0}$.

Выводы. Результаты обосновывают создание нового способа диагностики ЭКС с возможностью анализа состояния узла системы, имеющей ЭКС, без приостановки эксплуатации. Полученные теоретические данные позволяют сформировать нормативную базу, необходимую при разработке и использовании диагностического инструмента на реальном стенде. Необходимые входные данные для проведения вычисления дают основание для рассмотрения возможностей модернизации способа с целью реализации бесконтактного метода диагностики ЭКС, а также автоматизации сбора таких данных для каждого ЭКС в случае диагностики системы с множеством ЭКС в единое рабочее пространство с возможностью автоматического программного вычисления и выводом рекомендуемых сроков проведения ремонтных работ.

Выводы, сделанные на основании теоретических расчетов, будут использованы при реализации лабораторного стенда с целью практического подтверждения результатов.

Список литературы

1. Holm R. Electric Contacts: Theory and Application. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2013. 484 p.
2. Чихос Х. Системный анализ в трибонике / пер. с англ. С. А. Харламова. М.: Мир, 1982. 351 с.
3. Sepp Y. I., Rubtsov A. A. Alternating currents origination from vibration of electrical contacts in switch-

- gears // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engin. Conf. (ElConRusNW). St. Petersburg, Russian Federation, 2016. P. 681–684, doi: 10.1109/ElConRusNW.2016.7448274.

4. Yang S. J., Ellison A. J. Machinery Noise Measurement. Oxford, England: Clarendon Press, 1985. 165 p.

Информация об авторе

Косьянов Никита Михайлович – аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: nikmaniwe@gmail.com

References

1. Holm R. Electric Contacts: Theory and Application. Germany: Springer Berlin Heidelberg, 2013. 484 p.

2. Chihos H. Sistemnyj analiz v tribonike / per. s angl. S. A. Harlamova. M.: Mir, 1982. 351 s. (In Russ.).

3. Sepp Y. I., Rubtsov A. A. Alternating currents origination from vibration of electrical contacts in switchgears // IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engin. Conf. (EIConRusNW). St. Petersburg,

Russian Federation, 2016. P. 681–684. doi: 10.1109/EIConRusNW.2016.7448274.

4. Yang S. J., Ellison A. J. Machinery Noise Measurement. Oxford, England: Clarendon Press, 1985. 165 p.

Information about the author

Nikita M. Kosyanov – postgraduate student of the Department of Robotics and Automation of Production Systems, Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: nikmaniwe@gmail.com

Статья поступила в редакцию 23.05.2023; принята к публикации после рецензирования 16.06.2023; опубликована онлайн 19.10.2023.

Submitted 23.05.2023; accepted 16.06.2023; published online 19.10.2023.
