

## Способ непрерывного контроля скользящего контактного соединения в процессе движения электрического подвижного состава

М. А. Степанов, А. П. Степанов✉

*Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, Российская Федерация*

✉ Stepanov\_AP@irgups.ru

### Резюме

В статье рассматривается способ непрерывного мгновенного контроля скользящего контактного соединения, подверженного воздействию переменного по величине электрического тягового тока, внешних факторов, технических неисправностей, вызывающих искрение, образование электрической дуги, значительные изменения сопротивления контакта, возникающих в процессе движения электрического подвижного состава. Скользящий электрический контакт по сравнению с обычными электрическими контактами имеет свои особенности из-за постоянного движения контакта в пространстве. При движении электрического подвижного состава по железной дороге на разных участках контактной сети нарушения в нормальной работе скользящего контактного соединения могут встречаться по отдельности, в разных сочетаниях или все вместе в зависимости от состояния контактного провода, пантографа, других конструктивных и внешних факторов. Суть способа сводится к тому, что электрический тяговый ток, проходящий через скользящий контакт между пантографом и контактным проводом, раскладывается в ряд Фурье в реальном масштабе времени. Из полученного спектра электрического тягового тока вычитаются гармоники тока, связанные с нормальной работой электрооборудования электрического подвижного состава. Оставшиеся гармоники спектра тока будут характеризовать мгновенное интегральное состояние скользящего электрического контакта. Сравнение гармоник полученного спектра с гармониками эталонного спектра, характеризующего нормальную работу скользящего контакта, позволяет дать оценку неисправностям пантографа и контактного провода. Непрерывный, практически мгновенный контроль, позволяет определять место контакта пантографа на контактном проводе на участке движения электрического подвижного состава при условии согласования работы анализатора спектров с положением электроподвижного состава на участке пути.

### Ключевые слова

скользящий электрический контакт, непрерывный контроль электрического контакта, электрический подвижной состав

### Для цитирования

Степанов М. А. Способ непрерывного контроля скользящего контактного соединения в процессе движения электрического подвижного состава / М. А. Степанов, А. П. Степанов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 10–16. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).10-16

### Информация о статье

поступила в редакцию: 20.02.2020, поступила после рецензирования: 14.03.2020, принята к публикации: 10.08.2020

## A method for continuous monitoring of the sliding contact joint during the movement of electric rolling stock

М. А. Stepanov, A. P. Stepanov✉

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, the Russian Federation*

✉ Stepanov\_AP@irgups.ru

### Abstract

The article considers a method for continuous instantaneous control of a sliding contact joint exposed to alternating electric traction current, external factors, technical failures that cause sparking, the formation of an electric arc, and significant changes in the contact resistance that occur during the movement of electric rolling stock. The sliding electrical contact has its own characteristics in comparison with conventional electrical contacts due to the constant movement of the contact in space. During the movement of electric rolling stock by rail on different sections of the overhead contact system, violations of the normal operation of the sliding contact joint may occur separately, in different combinations, or all together, depending on the state of the contact wire, pantograph, and other structural and external factors. The essence of the method is that the electric traction current passing through the sliding contact between the pantograph and the contact wire is decomposed into a Fourier series in real time. Current harmonics associated with the normal operation of electrical equipment of electric rolling stock are subtracted from the obtained spectrum of electric traction current. The remaining harmonics of the current spectrum will characterize the instantaneous integral state of the sliding electric contact. Comparing the harmonics of the obtained spectrum with the harmonics of the reference spectrum, which characterizes the normal operation of the sliding contact, allows us to assess the defects of the pantograph and the contact wire. Continuous, almost instantaneous monitoring makes it possible to determine the contact point of the pantograph

on the contact wire on the section of the electric rolling stock, provided that the operation of the spectrum analyzer is coordinated with the position of the electric rolling stock on the track section.

### Keywords

sliding electric contact, continuous monitoring of electric contact, electric rolling stock

### For citation

Stepanov M. A., Stepanov A. P. Sposob nepreryvnogo kontrolya skol'zyashchego kontaktного soedineniya v protsesse dvizheniya elektricheskogo podvizhnogo sostava [A method of continuous control of sliding contact joint during the movement of electric rolling stock]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2020, No. 3(67), pp. 10–16. 10.26731/1813-9108.2020.3(67).10-16

### Article Info

Received: 20.02.2020, Revised: 14.03.2020, Accepted: 10.08.2020

### Введение

В электрических цепях используется большое число типов контактных соединений [1–9]. Работа контактного соединения начинается с нормального режима до аварийного. Электрический контакт зависит от удельного сопротивления материала (или материалов), площади контакта, контактного давления, температуры, оксидных пленок, а также от внешних факторов, связанных с условиями эксплуатации. По мере эксплуатации контактов происходит ухудшение их параметров, приводящих к выходу из строя. При этом могут наблюдаться повышенный нагрев, окисление, искрение, образование электрической дуги, разбрызгивание металла [1–4]. В этих режимах работы контактное соединение может быть представлено нелинейным электрическим элементом, характеризующимся не только одним электрическим параметром (активным переходным сопротивлением), но и другими параметрами, позволяющими оценить работу контактного соединения [5]. Процесс старения контактного соединения протекает с различной скоростью, зависящей от условий эксплуатации, поэтому способы контроля при однократной процедуре измерения активного сопротивления контактного соединения не позволяют оценить динамику развития процесса старения контактного соединения, причины изменения контактного сопротивления [1–5].

Скользящий электрический контакт имеет свои особенности из-за движения в пространстве. Так, при движении электрического подвижного состава по железной дороге на разных участках контактной сети указанные выше нарушения в нормальной работе скользящего контактного соединения могут встречаться по отдельности, в разных сочетаниях или все вместе, в зависимости от состояния контактного провода, пантографа, других конструктивных и внешних факторов [3].

В настоящее время контроль скользящего контактного соединения на электрифицированных железных дорогах ведется периодически, нарушения в нормальной работе скользящего контакта по мере

движения электроподвижного состава не связаны с местом на участке контактного провода [6–9].

Рассматриваемый способ контроля скользящего контактного соединения электроподвижного состава может быть использован при создании высококачественных систем контроля при эксплуатации электрического подвижного состава и контактных сетей электрифицированных железных дорог.

### Постановка задачи

Рассмотрим разработку способа непрерывного контроля скользящего электрического контактного соединения пантографа с контактным проводом в процессе движения электрического подвижного состава, позволяющего мгновенно оценить состояние скользящего электрического контакта вне зависимости от величины несинусоидального тягового (сетевого) тока, а также степень аварийности участков контактного провода [10].

### Решение задачи

Способ контроля скользящего электрического контактного соединения пантографа с контактным проводом в процессе движения электроподвижного состава [10] разработан на основе теории гармонического анализа [11] и на результатах некоторых работ [12–21].

Ниже представлен график изменения переходного сопротивления электрического контакта в зависимости от температуры нагрева контакта (рис. 1) [1–4].

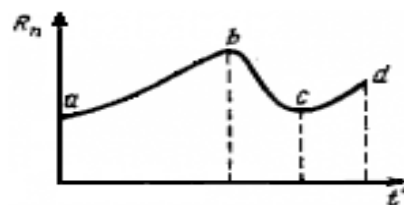


Рис. 1. График зависимости переходного сопротивления контакта  $R_n$  в зависимости от температуры нагрева  $t$

Fig. 1. The graph of the dependence of the contact resistance  $R_n$  depending on the heating temperature  $t$

Рассмотрим более подробно обозначенные участки кривой. При возрастании температуры контакта на участке а–b кривой происходит увеличение переходного сопротивления  $R_n$  за счет нагрева материала контакта. На участке b–с кривой за счет размягчения материала контакта от нагрева увеличивается площадь контакта и, как следствие, уменьшается переходное сопротивление  $R_n$ . На участке с–d переходное сопротивление  $R_n$  растет за счет дальнейшего нагрева материала контакта вплоть до его полного расплавления [1–4].

Согласно приведенной зависимости сопротивления от температуры  $R_n$  (см. рис. 1) электрический контакт может быть представлен элементом, у которого статическая вольт-амперная характеристика  $U = R_n I$  зависит от температуры, изменение которой по сравнению с быстро изменяющимся током можно считать незначительной. Для этого режима работы скользящий контакт можно считать линейным элементом, не искажающим форму кривой тягового тока [18]. Далее представлены типичные кривые сетевого (тягового) тока и напряжения электроподвижного состава (рис. 2).

При движении электрического подвижного состава прижимающие усилия между контактирующими поверхностями скользящего электрического контакта могут сильно изменяться, поэтому площадь скользящего контакта может значительно варьироваться [6–9].

В общем случае для скользящего электрического контакта кривые изменения сопротивления в зависимости от технических, эксплуатационных и внешних условий могут значительно отличаться от статической кривой (см. рис. 1), т. е. активное сопротивление  $R_n$  становится составной частью полного комплексного сопротивления:

$$Z_n = R_n + jX_n, \quad (1)$$

включающего в себя емкостную реактивную составляющую сопротивления  $X_n$ , где  $j$  – мнимая единица [13, 14, 19–21]. Отметим, что величина сопротивления реактивной емкостной составляющей  $X_n$  зависит от частоты гармоник несинусоидального тягового тока [19, 20].

Искрение и электрическая дуга скользящего контакта позволяют считать его нелинейным элементом, являющимся генератором токов высших гармоник искажающих форму кривой тягового тока, поэтому для контроля и оценки работоспособности скользящего контактного соединения в широком диапазоне его эксплуатации требуется интегральный подход, учитывающий влияние всех изменяющихся параметров при движении электрического подвижного состава [11, 13–18].

Рассмотрим влияние параметров электрической дуги на спектр тока дуги на примере электрической дуги электросварки [11, 13–21]. Ток и напряжение электрической дуги электросварки между двумя контактируемыми поверхностями, электродом и свариваемым металлом связаны нелинейной падающей вольт-амперной характеристикой [18].

Таким образом, по вольт-амперной характеристике можно анализировать состояние электрической дуги [18]. При изменении по величине протекающего тока рабочая (изображающая) точка будет перемещаться по вольт-амперной характеристике, отражая нелинейную зависимость между током и напряжением в каждой точке кривой. При делении действующих значений напряжения на ток получаем модуль полного комплексного сопротивления (1), характеризующего электрическую дугу, а в нашем случае контактное соединение:

$$Z_n = U/I = \sqrt{R_n^2 + X_n^2}, \quad (2)$$

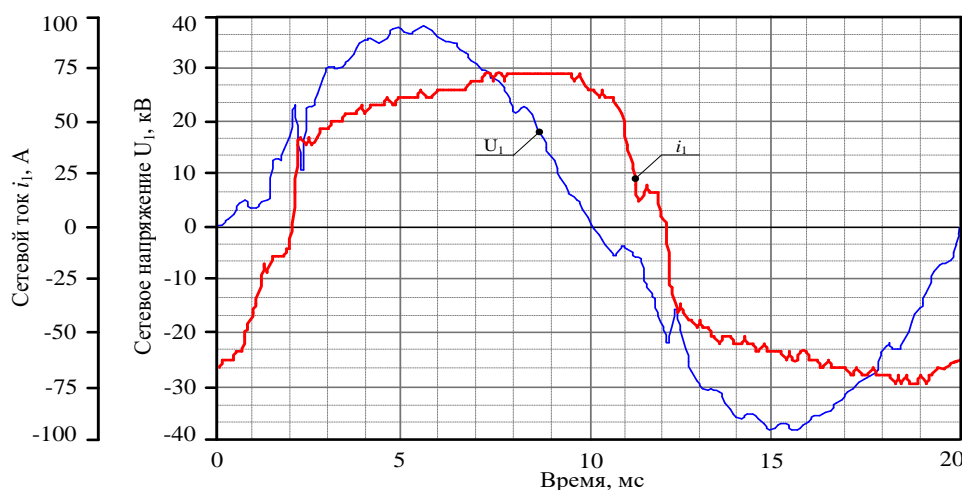


Рис. 2. Типичные сетевые несинусоидальные ток  $i$  и напряжение  $u$

Fig. 2. Typical mains non-sinusoidal current  $i$  and voltage  $u$

Допустим, что к контактам приложено синусоидальное напряжение, тогда в силу нелинейности вольт-амперной характеристики форма кривой тока претерпевает изменения. Ток становится несинусоидальным, т. е. появляются высшие гармоники при разложении в ряд Фурье, зависящие от положения рабочей точки на вольт-амперной характеристики [19–21]. Таким образом, наряду с полным комплексным сопротивлением (2) полученные гармоники тока будут характеризовать электрическую дугу. Далее в качестве примера приведены осциллограмма тока электрической дуги (рис. 3) и спектр этого тока при электросварке переменным (синусоидальным) током (рис. 4) [16–18].

Поставленная задача решается с помощью реализации алгоритма, представленного в патенте [10]. Тяговый электрический ток, проходящий через

скользящий контакт между пантографом и контактным проводом, раскладывается в ряд Фурье в реальном масштабе времени. Таким образом, получаем суммарный спектр, характеризующий работу скользящего контакта и силового электрооборудования подвижного состава. Из полученного спектра тягового электрического тока вычитаем гармоники, связанные с нормальной работой силового электрооборудования электрического подвижного состава. При нормальной работе скользящего контакта полученный в результате вычитания спектр практически будет нулевым. В противном случае, не нулевые гармоники спектра будут характеризовать отклонения от нормальной работы скользящего контакта.

Оставшиеся после вычитания гармоники спектра несинусоидального тягового тока дают информацию об искрении или (и) об образовании электрической дуги.

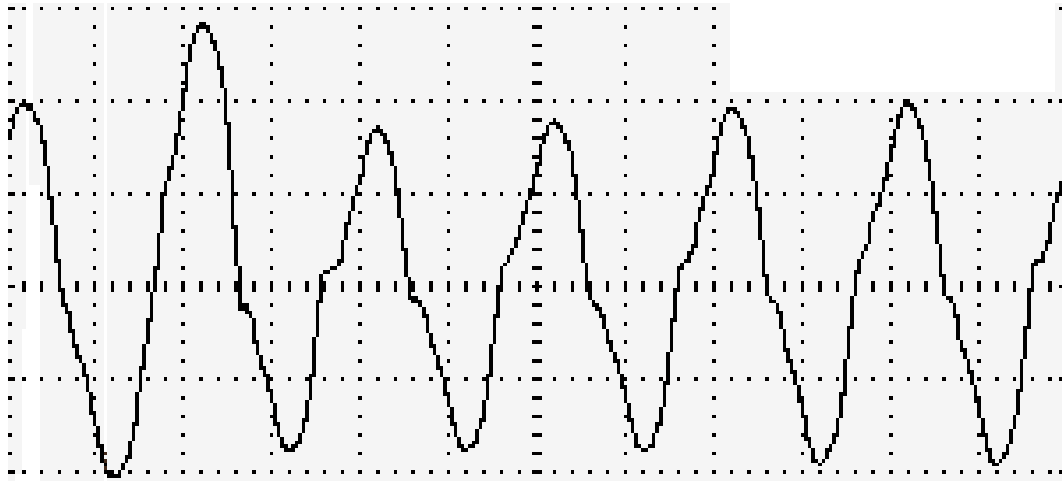


Рис. 3. Осциллограмма тока электрической дуги

Fig. 3. Oscillogram of the electric arc current

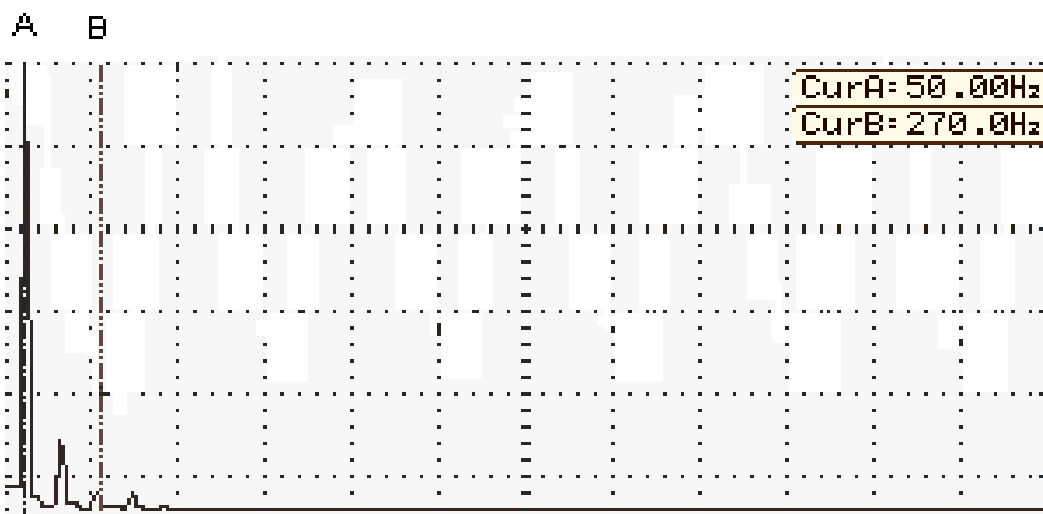


Рис. 4. Спектр тока электрической дуги

Fig. 4. Spectrum of electric arc current

Появление емкостной реактивной составляющей  $X_n$  полного комплексного сопротивления (1) искажает форму кривой тягового тока в сторону увеличения доли высших гармоник при его разложении в ряд Фурье [13, 15, 18–21].

Сравнение полученного спектра с эталонным спектром тягового электрического тока характеризующего нормальную работу скользящего контакта, позволяет дать оценку характерным неисправностям пантографа и контактного провода.

Для реализации способа на практике требуемое цифровое оборудование, включающее анализатор спектра, устанавливается на электрическом подвижном составе. Расчеты по приведенному алгоритму на установленном цифровом оборудовании проводятся в реальном времени. На установленном оборудовании должно быть предусмотрено согласование с местом положения электрического подвижного состава относительно железнодорожного пути и, следовательно, относительно контактной линии. Таким образом, при движении электрического подвижного состава непрерывно осуществляется контроль скользящего контакта и определяется место пантографа на контактном проводе [10].

При реализации способа на многих единицах электроподвижного состава появляется возмож-

ность автоматизировать процесс контроля контактного провода при нормальной работе пантографа, а также обнаруживать отклонения от нормальной работы пантографа при хорошем состоянии контактного провода, что делает контроль оперативным, повышает надежность и безопасность движения поездов [10].

### Выводы

Способ непрерывного мгновенного контроля скользящего контактного соединения, подверженного воздействию переменного по величине электрического тягового тока, внешних факторов, технических неисправностей, вызывающих искрение, образование электрической дуги, значительные изменения сопротивления контакта, возникающих в процессе движения электрического подвижного состава, позволяет мгновенно осуществить интегральную оценку состояния контактного соединения.

Реализация предложенного способа на практике позволит оценить состояния пантографа и участков контактного провода при движении электрического подвижного состава, что дает возможность принимать решения в реальном времени.

### Список литературы

1. Мерл В. Электрический контакт // Библиотека по автоматике. Вып. 51. М.-Л. : Госэнергоиздат, 1962. 80 с.
2. Родштейн Л.А. Электрические аппараты. 4-е изд., перераб. и доп. Л. : Энергоатомиздат, 1989. 368 с.
3. Проектирование электрических аппаратов : учеб. для вузов / Г.Н. Александров, В.В. Борисов, Г.С. Каплан и др. 2-е изд., перераб. и доп. СПб. : Изд-во СПбГТУ, 2000. 500 с.
4. Общие сведения об электрических контактах [Электронный ресурс]. URL: <http://elektrokontakty.ru/> (дата обращения 28.07.2020).
5. Способы контроля состояния контактных соединений в процессе эксплуатации электрических сетей [Электронный ресурс]. URL: <http://electricalschool.info/main/ekspluat/200-sposoby-kontrolja-stojaniija.html> (дата обращения 28.07.2020).
6. Горошков Ю.И., Бондарев Н.А. Контактная сеть. М. : Транспорт, 2011. 400 с.
7. Ефимов А.В., Галкин А.Г. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог : учеб. для вузов ж/д транспорта. М. : УМК МПС России, 2000. 511 с.
8. Магидин Ф.А. Устройство и эксплуатация контактной сети. М. : Маршрут, 2006. 62 с.
9. Беляев И.А. Устройство и обслуживание контактной сети при высокоскоростном движении. М. : Транспорт, 1989.
10. Пат. № 2713575 Рос. Федерация, RU2 713 575 C1, МПК G01R 31/01 (2006.01), B60L 5/4 (2006.01), B60M (2006.01). Способ контроля состояния скользящего контактного соединения пантографа с контактным проводом в процессе движения электрического подвижного состава железных дорог / А.П. Степанов, М.А. Степанов, Е.М. Степанов; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. № 20191214372, заявл. 07.05.2019 опубл. 05.02.2020. Бюл. № 4.
11. Гольдман С. Гармонический анализ, модуляция и шумы. М. : Изд-во иностр. лит., 1951. 408 с.
12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб. : Питер, 2003. 604 с.
13. Пат. № 2515360 Рос. Федерация, RU2 515 360 C2, МПК G01R 31/01 (2006.01). Способ контроля состояния контактных соединений электрических цепей / А.П. Степанов, А.А. Пыхалов, М.А. Степанов, Г.А. Пыхалов; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. № 2012121740/28, заявл. 25.05.2012 опубл. 10.05.2014. Бюл. № 13.
14. Пыхалов Г.А., Степанов А.П. Влияние параметров контактных соединений на электропроводность сборных конструкций // Проблемы транспорта Восточной Сибири : сб. тр. Третьей Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных электромеханического факультета. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2012. Ч. 2. С. 164–169.
15. Пыхалов Г.А., Степанов А.П. Способы контроля состояния контактных соединений электрических сетей // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: матер. VI Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 13–17 мая 2013 г. Иркутск. В 2 т. Иркутск : Изд-во ИрГУПС, 2013. С. 307–312.

16. Пат. № 2319586 Рос. Федерация, RU 2 319 586 C2, МПК В23К 9/10 (2006.01). Способ контроля и управление процессом электросварки / А.П. Степанов, А.И. Милованов, С.С. Черняк, В.Н. Саломатов, М.В. Лопатин, В.Ф. Бутаков, М.А. Степанов; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщен. № 2005136650/02, заявл. 24.11.2005, опубл. 20.03.2008. Бюл. № 8.
17. Степанов А.П. Способ контроля и управления процессом электросварки / А.П. Степанов, А.И. Милованов, М.А. Степанов // Современные проблемы машиностроения : тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. Томск : Изд-во ТПУ, 2008. 666 с.
18. Сварка. Резка. Контроль : справочник / Под ред. Н.П. Алёшина. М. : Машиностроение, 2005. 437 с.
19. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке и др. М. : Энергоатомиздат, 1989. 528 с.
20. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М. : Высшая школа, 1978. 528 с.
21. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М. : Наука, 1974. 831 с.

### References

1. Merl V. Elektricheskii kontakt [Electrical contact]. Biblioteka po avtomatike [Automation Library], iss. 51. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat Publ., 1962. 80 p.
2. Rodshtein L.A. Elektricheskie apparaty [Electric devices]. 4th ed., revised and enlarged. Leningrad.: Energoatomizdat Publ., 1989. 368 p.
3. Aleksandrov G.N., Borisov V.V., Kaplan G.S. et al. Proektirovanie elektricheskikh apparatov: ucheb. dlya vuzov [Design of electrical devices: textbook. for universities. A university textbook]. In Aleksandrov G.N. (ed.) 2nd ed., revised and enlarged. St.Petersburg: SPbGTU Publ., 2000. 500 p.
4. Obshchie svedeniya ob elektricheskikh kontaktakh [General information about electrical contacts]. [Electronic media]. URL: <http://elektrokontakty.ru/>
5. Sposoby kontrolya sostoyaniya kontaktnykh soedinenii v protsesse ekspluatatsii elektricheskikh setei [Methods for monitoring the state of contact connections during the operation of electrical networks] [Electronic media]. URL: <http://electricalschool.info/main/ekspluat/200-sposoby-kontrolja-stojaniya.html>
6. Goroshkov Yu.I., Bondarev N.A. Kontaktnaya set' [Overhead contact system]. Moscow: Transport Publ., 2011. 400 p.
7. Efimov A.V., Galkin A.G. Nadezhnost' i diagnostika sistem elektrosnabzheniya zheleznykh dorog: ucheb. dlya vuzov zh/d transporta [Reliability and diagnostics of railway power supply systems: a textbook for universities of railway transport]. Moscow: UMK MPS Rossii Publ., 2000. 511p.
8. Magidin F.A. Ustroistvo i ekspluatatsiya kontaktnoi seti [The arrangement and operation of the overhead contact system]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 62 p.
9. Belyaev I.A. Ustroistvo i obsluzhivanie kontaktnoi seti pri vysokoskorostnom dvizhenii [The arrangement and maintenance of the overhead contact system in case of high-speed traffic]. Moscow: Transport Publ., 1989.
10. Stepanov A.P., Stepanov M.A., Stepanov E.M. Sposob kontrolya sostoyaniya skol'zyashchego kontaktnogo soedineniya pantografa s kontaktnym provodom v protsesse dvizheniya elektricheskogo podvizhnogo sostava zheleznykh dorog [A method for monitoring the state of a sliding contact joint of a pantograph with a contact wire during the movement of railway electric rolling stock]. Pat. No. 2713575 RF, RU2 713 575 S1, MPK G01R 31/01 (2006.01), B60L 5/4 (2006.01), B60M (2006.01); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport University No. 20191214372, applied May 07, 2019, publ. Feb 02, 2020. Bull. No. 4.
11. Gol'dman S. Garmonicheskii analiz, modulyatsiya i shumy [Harmonic analysis, modulation and noise]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literaturny Publ., 1951. 408 p.
12. Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov [Digital signal processing]. St. Petersburg. : Piter Publ., 2003. 604 p.
13. Stepanov A.P., Pykhalov A.A., Stepanov M.A., Pykhalov G.A. Sposob kontrolya sostoyaniya kontaktnykh soedinenii elektricheskikh tsepei [A method for monitoring the state of contact joints of electrical circuits]. Pat. No. 2515360 RF, RU2 515 360 S2, MPK G01R 31/01 (2006.01); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport University. No.2012121740/28, applied May 25, 2012, publ. May 10, 2014. Bull. No. 13.
14. Pykhalov G.A., Stepanov A.P. Vliyanie parametrov kontaktnykh soedinenii na elektroprovodnost' sbornykh konstruktssii [Influence of parameters of contact connections on the electrical conductivity of prefabricated structures]. Problemy transporta Vostochnoi Sibiri: sb. tr. Tret'ei Vserossiiskoi nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh elektromekhanicheskogo fakul'teta [Problems of transport in Eastern Siberia: collection of research s of the Third All-Russian scientific and practical conf. of students, graduate students and young scientists of the electromechanical department]. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2012. Ch. 2. Pp. 164–169.
15. Pykhalov G.A., Stepanov A.P. Sposoby kontrolya sostoyaniya kontaktnykh soedinenii elektricheskikh setei [Methods for monitoring the state of contact joints of electrical networks]. Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona: mater. VI Vserossiiskoi nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, 13–17 maya 2013 g. [Transport infrastructure of the Siberian region: mater. of the VI All-Russian scientific-practical. conf. with intern. participation]. Irkutsk. In 2 vols. Irkutsk: IrGUPS Publ., 2013. Pp. 307–312.
16. Stepanov A.P., Milovanov A.I., Chernyak S.S., Salomatov V.N., Lopatin M.V., Butakov V.F., Stepanov M.A. Sposob kontrolya i upravlenie protsessom elektrosvarki [A method of control and management of the electric welding process]. Pat. No. 2319586 RF, RU 2 319 586 C2, МПК В23К 9/10 (2006.01); applicant and patent holder is Irkutsk State Transport University No. 2005136650/02, applied Nov. 24, 2005, publ. Mar. 20, 2008. Bull. No. 8.
17. Stepanov A.P., Milovanov A.I., Stepanov M.A. Sposob kontrolya i upravleniya protsessom elektrosvarki [A method of control and management of the electric welding process]. Sovremennye problemy mashinostroeniya. Trudy IV Mezhdunarodnoi

nauch.-tehnich. konf. [Modern problems of mechanical engineering. Proceedings of the IV International scientific and technical. conf.]. Tomsk: TPU Publ., 2008. 666 p.

18. Aleshin N.P. (ed.) Svarka. Rezhka. Kontrol': Spravochnik [Welding. Cutting. Control: Handbook]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 2005. 437 p.

19. Zeveke G.V. et al. Osnovy teorii tsepei [Fundamentals of circuit theory]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989. 528 p.

20. Bessonov L.A. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1978. 528 p.

21. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov [The handbook of mathematics for scientists and engineers]. Moscow: Nauka Publ., 1974. 831 p.

### Информация об авторах

**Степанов Максим Александрович** – к. т. н., доцент кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Stepanov\_MA@irgups.ru

**Степанов Александр Петрович** – к. т. н., доцент, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, Иркутский государственный университет путей сообщения, г. Иркутск, e-mail: Stepanov\_AP@irgups.ru

### Information about the authors

**Maksim A. Stepanov** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor of the Subdepartment of Electric Power Engineering in Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Stepanov\_MA@irgups.ru

**Aleksandr P. Stepanov** – Ph.D. in Engineering Science, Associate Professor, Professor of the Subdepartment of Electric Power Engineering in Transport, Irkutsk State Transport University, Irkutsk, e-mail: Stepanov\_AP@irgups.ru

DOI 10.26731/1813-9108.2020.3(67).16-22

УДК 621.01

## Разработка методики расчета зависимости частоты вращения плосколопастной крыльчатки с трубой от расхода жидкости

**А. В. Бальчугов**✉, **Б. О. Кустов**, **А. В. Бадеников**

*Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Российская Федерация*

✉ balchug@mail.ru

### Резюме

В статье приводится разработанная методика расчета зависимости частоты вращения плосколопастной крыльчатки с трубой от расхода потока жидкости и результаты экспериментальной проверки предложенной методики. Актуальность работы обусловлена тем, что устройства с вращающейся крыльчаткой и трубой являются перспективными для интенсификации процесса переноса теплоты, а приемлемая инженерная методика их расчета в настоящее время отсутствует. В основу методики расчета положено модифицированное классическое уравнение движения крыльчатки, представленное в виде баланса движущего момента вращения крыльчатки и суммы моментов потерь, с учетом момента трения во вращающейся вместе с крыльчаткой трубе и с учетом массы вращающейся жидкости. Методика расчета справедлива для плосколопастных крыльчаток со ступицей, имеющей конусообразные выступы на торцах, причем лопасти крыльчатки жестко крепятся к стенкам трубы. Показано, что по результатам расчета из-за потерь энергии на трение во вращающейся трубе, крыльчатке, подшипниковых опорах и манжетных уплотнениях частота вращения плосколопастной крыльчатки снижается на 9,4 % в сравнении с максимальной (идеальной частотой вращения). Предложенная методика расчета позволяет получить линейное уравнение зависимости частоты вращения крыльчатки от расхода потока жидкости в трубе с достоверностью аппроксимации 0,968 в диапазоне расхода воды 1,7–3,4 м<sup>3</sup>/ч. Выполнена экспериментальная проверка расчетной зависимости, полученной в результате расчета по методике. Допустимое отклонение результатов расчета от результатов эксперимента в размере 8,1–14,7 % наблюдается в диапазоне расхода воды 1,95–2,8 м<sup>3</sup>/ч. При расходе воды менее 1,7 м<sup>3</sup>/ч труба вращалась нестабильно. Разработанная методика расчета и полученные уравнения зависимости частоты вращения от расхода воды будут востребованы при разработке новых устройств для интенсификации процессов переноса тепла за счет вращения крыльчатки с теплообменной трубой потоком жидкости.

### Ключевые слова

плосколопастная крыльчатка, частота вращения крыльчатки, инженерная методика расчета, вращение трубы, крутящий момент, влияние расхода жидкости, экспериментальная проверка

### Для цитирования

Бальчугов А. В. Разработка методики расчета зависимости частоты вращения плосколопастной крыльчатки с трубой от расхода жидкости / А. В. Бальчугов, Б. О. Кустов, А. В. Бадеников // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2020. – № 3(67). – С. 16–22. – DOI: 10.26731/1813-9108.2020.3(67).16-22

### Информация о статье

поступила в редакцию: 24.02.2020, поступила после рецензирования: 16.03.2020, принята к публикации: 12.08.2020