

УДК 621.331:621.311

**А. В. Горькин, О. В. Гателюк**

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОПУСТИМОГО ЧИСЛА ОТКЛЮЧЕНИЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ И КОЛИЧЕСТВА ОТКЛЮЧЕННЫХ ТОКОВ**

***Аннотация.** В статье проанализированы причины отключений быстродействующих выключателей постоянного тока и получено распределение отключаемых токов. Рассматриваются такие числовые характеристики, как математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение функции распределения отключаемых быстродействующим выключателем токов. Проверена гипотеза о распределении вероятности отказа в срабатывании выключателя. Сделаны выводы о применимости приведенных методов расчета для определения допустимого числа отключений быстродействующих выключателей на участках тяговой сети постоянного тока.*

***Ключевые слова:** быстродействующий выключатель, количество электричества, сумма тока, вероятность отказа, математическое ожидание, среднеквадратическое отклонение, отключаемый ток, допустимое число отключений.*

**Artem V. Gor'kin, Oleg V. Gatelyuk**

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## **DEFINITION OF ADMISSIBLE NUMBER OF SHUTDOWNS OF HIGH-SPEED SWITCHES DEPENDING ON THE SIZE AND QUANTITY OF THE DISCONNECTED CURRENTS**

***Abstract.** In article the reasons of shutdowns of high-speed switches of a direct current are analysed and distribution of the disconnected currents is received. Such numerical characteristics as population mean and a mean square deviation of function of distribution of the currents which are disconnected by the high-speed switch are considered. The hypothesis of distribution of probability of refusal in operation of the switch is checked. Conclusions are drawn on applicability of the given calculation methods for definition of admissible number of shutdowns of high-speed switches on sites of traction network of a direct current.*

***Keywords:** high-speed switch; amount of electricity; current sum; probability of refusal; population mean; mean square deviation; the disconnected current; admissible number of shutdowns.*

На участках тяговой сети постоянного тока российских железных дорог наблюдается ежегодный рост максимальных рабочих токов, потребляемых электроподвижным составом (ЭПС), и скачков тока нагрузки. Это происходит вследствие развивающегося в России скоростного и тяжеловесного движения железнодорожного транспорта. В результате происходит увеличение количества отключений быстродействующих выключателей (БВ) [1, 2] и ухудшение условий их работы, что в свою очередь сказывается на увеличении эксплуатационных затрат на капитальный ремонт и обслуживание БВ. Поэтому проблемы чрезмерно малого межремонтного интервала при эксплуатации выключателей и своевременного контроля за их фактическим техническим состоянием имеют высокую актуальность.

В настоящее время периодичность выполнения ремонта БВ по техническому состоянию регламентируется отраслевым стандартом ОАО РЖД – «Правилами содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения» (далее – Правила) [3]. Кроме того, существуют технические указания «О по-

рядке эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования» № ЦЭТ-2 (П-02/04) от 30.03.2004 (далее – ТУ № П-02/04) [4] и «О внесении изменений в порядок эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования» № ЦЭТ-2/7 от 26.02.2008 [5], которые распространяются на тяговые подстанции (ТПС), оборудованные действующей системой технического диагностирования. Указанные нормативные документы дополняются стандартом предприятия – СТО РЖД 11.010-2013 «Электроустановки систем железнодорожного электроснабжения. Номенклатура физических величин, подлежащих контролю при постоянном техническом диагностировании» [6]. Указанные нормативные документы, к сожалению, во многом противоречат друг другу и характеризуются незавершенностью выдвигаемых требований к оборудованию системы электроснабжения.

Поэтому в настоящее время точность оценки состояния выключателей по техническому состоянию невысока, так как фактически контролируются только три параметра: коммутационный ресурс по току – 3000 кА суммарного отключенного тока, механический ресурс – 80 отключений и недовключенное положение БВ. Причем критерии этих параметров установлены для всех типов выключателей одинаковые. Поэтому, контролируя только эти три параметра, невозможно провести своевременную и объективную оценку состояния выключателей для определения оптимальных сроков их технического обслуживания, выявления предотказных состояний, что подтверждает актуальность данной темы для исследования [4, 5, 7, 8].

Для определения недостающих критериев была проведена экспериментальная оценка состояния сдвоенных БВ типа ВАБ-43-4000 на одном фидере и ВАБ-49-3200 на двух фидерах тяговой подстанции методом наработки на отказ [7, 8]. Выбор выключателей типа ВАБ-43 и ВАБ-49 обусловлен тем, что это самые массовые БВ, которые применяются на тяговых подстанциях сети железных дорог ОАО «РЖД». Вместе их доля от общего числа выключателей на тяговых подстанциях (5423 шт.) составляет более 70 %. Кроме того, БВ постоянного тока (по данным Западно-Сибирской железной дороги) в большинстве своем выработали свой нормативный срок – более 65 % выключателей находятся в эксплуатации от 30 до 50 лет и более. Поэтому они нуждаются в более детальной и объективной оценке, чем, например, современные и новые БВ типа ВАБ-206.

В работе [9] для фидера №2 ТПС Таскаево, который оснащен БВ типа ВАБ-43-4000, было определено суммарное значение количества электричества ( $It_{кр} = 35,4 \text{ кА} \cdot \text{с}$ ), прошедшего через дугу на контактах выключателя, которое вынесет расчетный объем металла при нормативно-допустимом износе подвижного дугогасительного контакта, равном 3 мм [3]. Указанное значение получено на основе экспериментальных данных [7, 8]:

- пиковое значение отключенного тока  $In_i$ ;
- число отключений  $n_0 = 1335$ ;
- среднее значение отключенного тока  $I_o = 4121,5 \text{ А}$ ;
- сумма отключенного тока  $\sum I_o = 5502,2 \text{ кА}$ ;
- среднее количество электричества  $It_{кр} = 50,66 \text{ кА} \cdot \text{с}$ ;
- среднее количество электричества на одно отключение  $It_{cp} = 37,94 \text{ А} \cdot \text{с}$ .

Из 1335 отключений БВ, параметры которых были зафиксированы и обработаны во время эксперимента [7, 8], в дальнейшем были проанализированы 233 осциллограммы, что позволило построить диаграмму распределения отключений БВ в зависимости от характера изменения тока в тяговой сети (рисунок 1).

В дальнейшем было построено распределение числа отключений по току (рисунок 2). При этом учитывались отключения от токов короткого замыкания и от бросков тяговой нагрузки (всего 86 отключений) как наиболее значимые в плане влияния на остаточный ресурс выключателей.

По полученным экспериментальным данным [7 – 9] рассчитано среднее число отключений БВ при нормативно-допустимом износе подвижного дугогасительного контакта, равном 3 мм:

$$n_d = \frac{It_{кр}}{It_{ср}} \cdot 10^3; \quad (1)$$

$$n_d = \frac{35,4}{37,94} \cdot 10^3 \approx 930,$$

где  $It_{кр}$  – суммарное значение количества электричества, кА·с;

$It_{ср}$  – среднее количество электричества на одно отключение, А·с.



Рисунок 1 – Распределение числа отключений в зависимости от характера изменения тока в тяговой сети

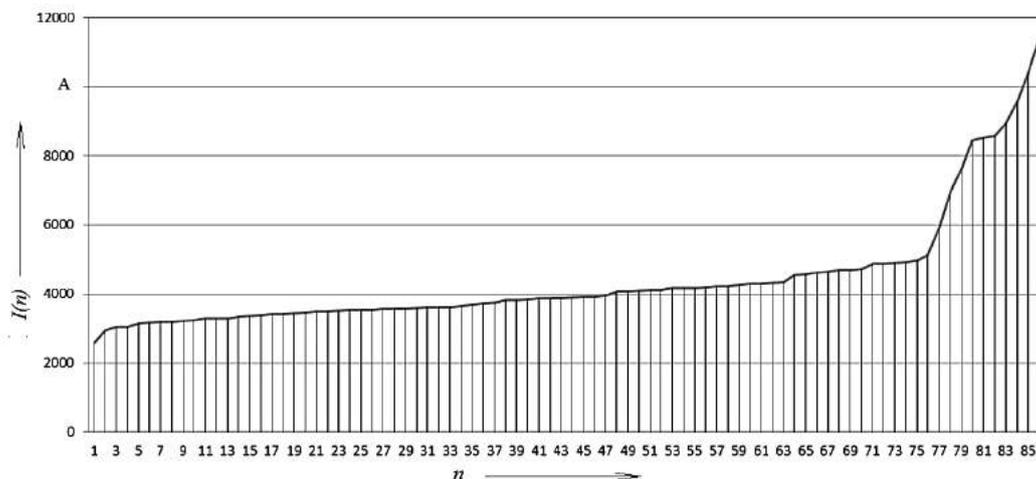


Рисунок 2 – Распределение числа отключений по току

Далее определим сумму отключенного тока для этого числа отключений:

$$I_{\Sigma} = I_0 \cdot n_d; \quad (2)$$

$$I_{\Sigma} = 4121,5 \cdot 930 \approx 3833000 \text{ А},$$

где  $n_d$  – среднее число отключений;

$I_0$  – среднее значение отключенного тока, А.

Допустимое число отключений для каждого значения отключенного тока (согласно данным рисунка 2) определяется по выражению:

$$n_i = \frac{I_{\Sigma}}{In_i} = \frac{3833000}{In_i}, \quad (3)$$

где  $In_i$  – значение тока при каждом отключении (86 значений), А.

Для нахождения таких числовых характеристик, как математическое ожидание и средне-квадратическое отклонение функции распределения отключаемых быстродействующим выключателем токов, воспользуемся в качестве основы методикой, приведенной в источнике [10].

Подставляя измеренные значения отключенного тока в выражение (3), построим его зависимость от допустимого числа отключений (рисунок 3).

Плотность распределения вероятности отключаемых токов при равной вероятности их расположения на всем измеряемом диапазоне (при  $I_k = 2580 \text{ A} \leq I \leq I_H = 11390 \text{ A}$  согласно зависимости на рисунке 2) определяется по выражению:

$$f(I) = \frac{I_H \cdot I_k}{I^2 \cdot (I_H - I_k)}, \quad (4)$$

где  $I_k = 2580 \text{ A}$  – значение тока, измеренного в конце диапазона (минимальный ток), A;

$I_H = 11390 \text{ A}$  – значение тока, измеренного в начале диапазона (максимальный ток), A;

$I$  – диапазон измеряемых токов (от 2580 до 11390 A).

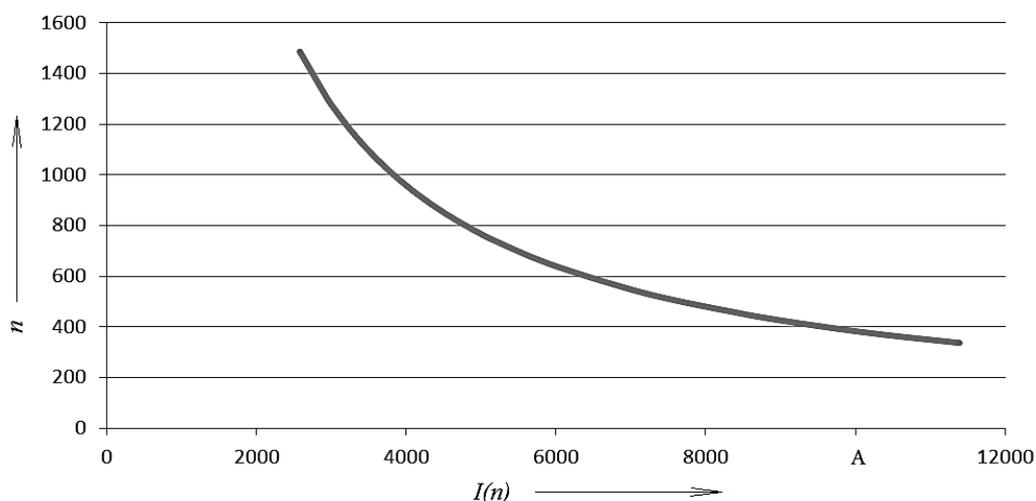


Рисунок 3 – Зависимость допустимого числа отключений от величины отключаемых токов

Подставляя известные значения в выражение (4), отобразим плотность распределения вероятности отключаемых токов графически (рисунок 4).

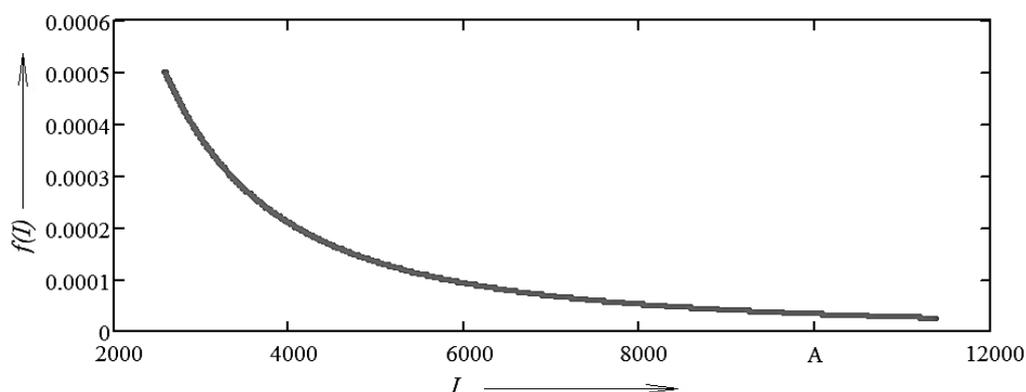


Рисунок 4 – Плотность распределения вероятности величины отключаемых токов

Таким образом, по плотности распределения вероятности, приведенной на рисунке 4, видно, что наиболее вероятны значения отключаемых выключателем токов менее 3000 – 4000 А.

Математическое ожидание отключаемого выключателем тока для зависимости, приведенной на рисунке 2, определим по выражению:

$$m_I = \int_{I_k}^{I_H} I^2 \cdot f(I) \cdot dI = \frac{I_H \cdot I_K}{I_H - I_K} \cdot (\ln(I_H) - \ln(I_K)); \quad (5)$$

$$m_I = \frac{11390 \cdot 2580}{11390 - 2580} \cdot (\ln(11390) - \ln(2580)) = 4953,1 \text{ А.}$$

Среднеквадратическое отклонение при этом будет вычисляться по выражению:

$$\sigma_I = \sqrt{\int_{I_k}^{I_H} I^2 \cdot f(I) \cdot dI - m_I^2} = \sqrt{I_H \cdot I_K - m_I^2}; \quad (6)$$

$$\sigma_I = \sqrt{11390 \cdot 2580 - 4953,1^2} = 2203 \text{ А,}$$

где  $m_I$  – математическое ожидание отключаемого выключателем тока, А.

Для определения математического ожидания числа отключений  $N$  необходимо определить параметр функциональной зависимости допустимого числа отключений от значения отключаемых токов [10]:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{N(I_i)}{I_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{I_i^2}}; \quad (7)$$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{86} \frac{1486}{2580} + \frac{1300}{2948} + \dots + \frac{337}{11390}}{\sum_{i=1}^{86} \frac{1}{2580^2} + \frac{1}{2948^2} + \dots + \frac{1}{11390^2}} = \frac{21,320185}{5,56219 \cdot 10^{-6}} = 3833056,$$

где  $N(I_i)$  – допустимое число отключений (зависимость на рисунке 3) при значениях тока, принимаемых согласно распределению на рисунке 2;

$I_i$  – значения отключаемых токов, принимаемых согласно распределению на рисунке 2.

Математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение допустимого числа отключений вычисляются по теоремам о числовых характеристиках функций случайных величин [11]. При этом определение законов распределения функции случайной величины не обязательно, а достаточно знание закона распределения самой случайной величины – аргумента.

Математическое ожидание допустимого числа отключений

$$m_N = \int_{I_k}^{I_H} N(I) \cdot f(I) \cdot dI = \frac{a}{2} \cdot \frac{I_H + I_K}{I_H \cdot I_K}; \quad (8)$$

$$m_N = \frac{3833056}{2} \cdot \frac{11390 + 2580}{11390 \cdot 2580} = 911,$$

где  $a$  – параметр функциональной зависимости допустимого числа отключений от значения отключаемых токов.

Среднеквадратическое отклонение допустимого числа отключений

$$\sigma_N = \sqrt{\int_{I_k}^{I_H} N^2(I) \cdot f(I) \cdot dI - m_N^2} = \sqrt{\frac{a^2 \cdot I_H \cdot I_k}{3 \cdot (I_H - I_k)} \cdot \left(\frac{1}{I_k^3} - \frac{1}{I_H^3}\right) - m_N^2}; \quad (9)$$

$$\sigma_N = \sqrt{\frac{3833056^2 \cdot 11390 \cdot 2580}{3 \cdot (11390 - 2580)} \cdot \left(\frac{1}{2580^3} - \frac{1}{11390^3}\right) - 911^2} = 332 \text{ А.}$$

Таким образом, по выражениям (5), (6), (8), (9) определяются числовые характеристики коммутационного ресурса выключателей в зависимости от величины и количества отключенных токов. Найденные числовые характеристики будут использованы для определения параметров распределения с целью нахождения вероятности отказа выключателя.

Отключение быстродействующим выключателем токов нагрузки или короткого замыкания представляет собой случайный процесс с дискретными состояниями и непрерывным аргументом. Таким образом, вероятность отказа в срабатывании будет являться функцией аргумента. Поэтому делаем допущение о том, что когда выключатель новый, вероятность отказа равна нулю. Соответственно при возрастании числа отключенных токов вероятность отказа БВ стремится к единице. Причем рост вероятности отказа срабатывания БВ происходит при возрастании числа отключенных токов (аргумента).

В этом случае функция отказа выключателя в зависимости от числа отключений  $q(N)$  обладает всеми свойствами интегральной функции распределения.

Для описания подобных процессов лучше всего подходит распределение Вейбулла [10].

Интегральная функция распределения Вейбулла при  $N \geq 0$  имеет вид:

$$q(N) = 1 - e^{-k \cdot N^\beta}, \quad (10)$$

где  $k$  – параметр;

$N$  – количество отключений;

$\beta$  – параметр формы.

Для нахождения интегральной функции распределения Вейбулла при  $N \geq 0$  воспользуемся методами, приведенными в работе [12]. Определим коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma_N}{m_N}; \quad (11)$$

$$v = \frac{332}{911} = 0,364.$$

Значения отключенных токов известны и отображены на распределении, приведенном на рисунке 2.

Зададимся начальным приближением для параметра  $\beta$ :

$$\beta_0 = v^{-1,075} = 0,364^{-1,075} = 2,96.$$

Определим значение параметра  $\alpha$  по выражению:

$$\alpha = \left( \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I_i^\beta \right)^{\frac{1}{\beta}}; \quad (12)$$

$$\alpha = \left( \frac{1}{86} \cdot (2580^{2,96} + 2948^{2,96} + \dots + 11390^{2,96}) \right)^{\frac{1}{2,96}} = 5124,8.$$

Определим значение параметра  $k$  по выражению:

$$k = \left( \frac{1}{\alpha} \right)^\beta; \quad (13)$$

$$k = \left( \frac{1}{5124,8} \right)^{2,96} = 1,046 \cdot 10^{-11}.$$

Исходя из полученных значений определим вероятностные характеристики отказа. Интенсивность потока отказов

$$\lambda = k \cdot \beta \cdot m_N^{(\beta-1)} \cdot 8760; \quad (14)$$

$$\lambda = 1,046 \cdot 10^{-11} \cdot 2,96 \cdot 911^{(2,96-1)} \cdot 8760 = 0,171 \text{ года}^{-1},$$

где 8760 – число часов в году.

Запишем интегральную функцию распределения Вейбулла:

$$q(N) = 1 - e^{-k \cdot N^\beta}; \quad (15)$$

$$q(N) = 1 - e^{-1,046 \cdot 10^{-11} \cdot 911^{2,96}} = 0,006.$$

В качестве основного вывода можно сказать, что приведенная выше математическая модель применима на всех участках тяговой сети для расчета числовых характеристик коммутационного ресурса быстродействующих выключателей и определения допустимого числа их отключений в зависимости от количества и величины отключаемых токов. Используя методы, приведенные в настоящей статье, а также в работе [7 – 9], можно с достаточной степенью точности спрогнозировать допустимое число отключений для любого типа быстродействующих выключателей.

### Список литературы

1. Горькин, А. В. Анализ работы коммутационных аппаратов тяговой подстанции постоянного тока в условиях прохождения электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током [Текст] / А. В. Горькин // Материалы всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием «Приборы и методы измерений, контроля качества и диагностики в промышленности и на транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2013. – С. 251 – 256.
2. Горькин, А. В. Анализ процессов изменения токов смежных фидеров при прохождении электроподвижным составом изолирующих сопряжений под током [Текст] / А. В. Горькин // Материалы науч.-практ. конф. «Инновационные проекты и технологии в образовании, промышленности и на транспорте» / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск, 2014. – С. 290 – 296.
3. Правила содержания тяговых подстанций, трансформаторных подстанций и линейных устройств системы тягового электроснабжения [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2016. – 96 с.
4. Техническое указание о порядке эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования [Текст]. Введено техническим указанием ОАО «РЖД» № ЦЭТ-2 (П-02/04) от 30.03.2004 / ОАО «РЖД». – М., 2004. – 14 с.

5. Техническое указание о внесении изменений в порядок эксплуатации тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования [Текст]. Введено техническим указанием ОАО «РЖД» № ЦЭТ-2/7 от 26.02.2008 / ОАО «РЖД». – М., 2008. – 18 с.
6. СТО РЖД 11.010-2013 «Электроустановки систем железнодорожного электроснабжения. Номенклатура физических величин, подлежащих контролю при постоянном техническом диагностировании» [Текст] / ОАО «РЖД». – М., 2013. – 7 с.
7. Горькин, А. В. Диагностика быстродействующих выключателей тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования [Текст] / А. В. Горькин // Материалы всерос. науч.-техн. конф. «Метрологическое и нормативное обеспечение качества и безопасности продукции» [Текст] / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. 2014. – С. 165 – 171.
8. Горькин, А. В. Обоснование увеличения межремонтных интервалов при эксплуатации быстродействующих выключателей постоянного тока тяговых подстанций, оборудованных системой технической диагностики / А. В. Горькин, А. М. Сапельченко, К. В. Писарев // Электроснабжение железных дорог: Межвуз. тематич. сб. науч. тр. / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. 2016. – С. 6 – 10.
9. Горькин, А. В. Оценка технического состояния быстродействующих выключателей тяговых подстанций, оборудованных системой технического диагностирования [Текст] / А. В. Горькин // Вестник РГУПС / Ростовский гос. ун-т путей сообщения. – Ростов-на-Дону. 2017. – № 2 (66). – С. 98 – 103.
10. Туманин, А. Е. Исследование и разработка метода оценки надежности работы выключателей в сложных электроэнергетических системах [Текст]: Дис... канд. техн. наук: 05.14.02 / Туманин Алексей Евгеньевич. – М., 2004. – 219 с.
11. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] / Е. С. Вентцель – М.: Наука, 1969. – 576 с.
12. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников [Текст] / А. И. Кобзарь. – М.: Физматлит, 2006. – 816 с.

## References

1. Gorkin A. V. The analysis of operation of switching offices of traction substation of a direct current in the conditions of passing by the electrorolling stock of the isolating interfaces alive [Analiz raboty kommutacionnyh apparatov tyagovoj podstancii postoyannogo toka v usloviyah prohozhdeniya ehlektropodvizhnym sostavom izoliruyushchih sopryazhenij pod tokom]. *Materialy vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uchastiem «Pribory i metody izmerenij, kontrolya kachestva i diagnostiki v promyshlennosti i na transporte»*. (Materials of the All-Russian scientific and technical conference with the international participation «Devices and methods of measurements, quality control and diagnostics in the industry and on transport»). Omsk. 2013. pp. 251 – 256.
2. Gorkin A. V. The analysis of processes of change of currents of adjacent feeders when passing by the electrorolling stock of the isolating interfaces alive [Analiz processov izmeneniya tokov smezhnyh fiderov pri prohozhdenii ehlektropodvizhnym sostavom izoliruyushchih sopryazhenij pod tokom]. *Materialy nauch.-prakt. konf. «Innovacionnye proekty i tekhnologii v obrazovanii, promyshlennosti i na transporte»* (Materials of the scientific and practical conference «Innovative Projects and Technologies in Education, the Industry and on Transport»). Omsk. 2014. pp 290 – 296.
3. *Pravila sodержaniya tyagovyh podstancij, transformatornyh podstancij i linejnyh ustrojstv sistemy tyagovogo ehlektrosnabzheniya* (Rules of maintenance of traction substations, transformer substations and linear devices of system of traction power supply), Moscow, JSC «Russian Railways», 2016, 96 p.

4. *Tekhnicheskoe ukazanie o poryadke ehkspluatacii tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskogo diagnostirovaniya* (The technical instruction about a method of operation of the traction substations equipped with the test system), Moscow, JSC «Russian Railways», 2004, 14 p.

5. *Tekhnicheskoe ukazanie o vnesenii izmenenij v poryadok ehkspluatacii tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskogo diagnostirovaniya* (The technical instruction on modification of a method of operation of the traction substations equipped with the test system), Moscow, JSC «Russian Railways», 2008, 18 p.

6. *STO RZHD 11.010-2013 «EHlektroustanovki sistem zheleznodorozhnogo ehlektrosnabzheniya. Nomenklatura fizicheskikh velichin, podlezhashchih kontrolyu pri postoyannom tekhnicheskoy diagnostirovanii»* (Electrical installations of railway power supply systems. Nomenclature of physical quantities subject to control under constant technical diagnosis), Moscow, JSC «Russian Railways», 2013, 7 p.

7. Gorkin, A. V. Diagnostics of high-speed switches of the traction substations equipped with the test system [Diagnostika bystrodejstvuyushchih vyklyuchatelej tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskogo diagnostirovaniya]. *Materialy vseros. nauch.-tekhn. konf. «Metrologicheskoe i normativnoe obespechenie kachestva i bezopasnosti produkcii»* (Materials of the All-Russian scientific and technical conference «Metrological and Standard Support of Quality and Safety of Production»). Omsk., 2014. pp. 165 – 171.

8. Gorkin, A. V. Justification of increase in between-repairs intervals at operation of high-speed switches of a direct current of the traction substations equipped with system of technical diagnostics [Obosnovanie uvelicheniya mezhremontnyh intervalov pri ehkspluatacii bystrodejstvuyushchih vyklyuchatelej postoyannogo toka tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskoy diagnostiki]. *Mezhvuz. tematich. sb. nauch. trudov. «EHlektrosnabzhenie zheleznih dorog»* (The Interuniversity thematic collection of scientific works «Power supply of the railroads»). Omsk, 2016, pp. 6 – 10.

9. Gorkin, A. V. Assessment of the technical condition of high-speed switches of traction substations equipped with a technical diagnosis system [Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya bystrodejstvuyushchih vyklyuchatelej tyagovyh podstancij, oborudovannyh sistemoj tekhnicheskogo diagnostirovaniya]. *Journal of RSTU Bulletin*. 2017. № 2 (66). – pp. 98 – 103.

10. Tumanin, A. E. *Issledovaniye i razrabotka metoda otsenki nadezhnosti raboty vyklyuchatelej v slozhnykh elektroenergeticheskikh sistemakh* (Research and development of a method for assessing the reliability of circuit breakers in complex electric power systems). Thesis for a degree of the Doctor of Engineering, Moscow, 2004. 219 p.

11. Wentzel, E. S. *Teoriya veroyatnostey* (Probability Theory). Moscow: The science, 1969, 576 p.

12. Kobzar, A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* (Applied mathematical statistics. For engineers and scientists). Moscow: FIZMATLIT, 2006, 816 p.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

### Горькин Артём Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Аспирант кафедры «Подвижной состав электрических железных дорог», ОмГУПС.

Тел.: +7 (960) 991-23-56.

E-mail: wert\_81\_06\_28@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

### Gor'kin Artem Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Post-graduate student of the department «Rolling stock electric railway», OSTU.

Phone: +7 (960) 991-23-56.

E-mail: wert\_81\_06\_28@mail.ru

## Гателюк Олег Владимирович

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС).

Маркса пр., д. 35, г. Омск, 644046, Российская Федерация.

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Высшая математика», ОмГУПС.

Тел.: +7 (902) 821-79-55.

E-mail: GatelukOV@omgups.ru

## Gatelyuk Oleg Vladimirovich

Omsk State Transport University (OSTU).

35, Marx st., Omsk, 644046, the Russian Federation.

Ph. D. in physical and mathematical sciences, Associate professor of the department "Higher Mathematics", OSTU.

Phone: +7 (902) 821-79-55.

E-mail: GatelukOV@omgups.ru

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СТАТЬИ

Горькин, А. В. Определение допустимого числа отключений быстродействующих выключателей в зависимости от величины и количества отключенных токов [Текст] / А. В. Горькин, О. В. Гателюк // Известия Транссиба / Омский гос. ун-т путей сообщения. – Омск. – 2017. – № 4(32). – С 68 – 77.

## BIBLIOGRAPHIC DESCRIPTION

Gor'kin A. V., Gatelyuk, O. V. Definition of admissible number of shutdowns of high-speed switches depending on the size and quantity of the disconnected currents. Journal of Transsib Railway Studies, 2017, vol. 32, no 4, pp. 68 – 77 (In Russian).

УДК 621.372.21: 681.3.068

## Т. В. Ковалева, О. О. Комякова, Н. В. Пашкова

Омский государственный университет путей сообщения (ОмГУПС), г. Омск, Российская Федерация

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ ТЯГОВОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С УЧЕТОМ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ

*Аннотация.* Анализ волновых процессов в системе, включающей в себя линии электропередач, тяговые подстанции, тяговую сеть переменного тока и электроподвижной состав, необходим для точной оценки энергетических показателей ее работы. Сложность такого анализа заключается в том, что рассматриваемая система является разветвленной с сосредоточенными и распределенными параметрами. Входящий в нее электроподвижной состав представляет собой динамическую нагрузку. Предлагаемая математическая модель системы тягового электроснабжения переменного тока позволяет рассмотреть электромагнитные процессы в различных ее точках с учетом волновых процессов.

*Ключевые слова:* волновые процессы, система тягового электроснабжения переменного тока, математическая модель.

## Tatiana V. Kovaleva, Olga O. Komyakova, Natalia V. Pashkova

Omsk State Transport University (OSTU), Omsk, the Russian Federation

## MATHEMATICAL MODEL OF THE RAILWAY TRANSPORT ALTERNATING CURRENT TRACTION POWER SUPPLY SYSTEM WITH WAVE PROCESSES CONSIDERATION

*Abstract.* The analysis of wave processes in the system including electric transmission lines, traction substations, AC traction network and electric locomotives is necessary to accurately assess to energy performance of its work. This system contains concentrated and distributed parameters, consequently the analysis of such a system is difficult and the rolling stock which is also a part of this system represents a dynamic load. The proposed mathematical model of the alternating current traction power supply system allows us to consider electromagnetic processes at its various points taking into account wave processes.