

УДК 621.311

## Алгоритмы и модели потерь мощности в автоматических выключателях, устанавливаемых в цеховых сетях

Е. И. Грачева\*, А. Н. Горлов, А. Н. Алимова

\*Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия;  
Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия;  
e-mail: grachieva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Информация о статье      Реферат

Поступила  
в редакцию  
16.07.2020

Ключевые слова:

автоматические выключатели, номинальный ток, контактные соединения, аппроксимирующие функции, конструктивные особенности

Для цитирования

Определение основных характеристик топологии и технического состояния оборудования в условиях эксплуатации необходимо для анализа и оценки потерь мощности и количества электроэнергии во внутрицеховых низковольтных сетях промышленного электроснабжения. Сравнительный анализ технических характеристик автоматических выключателей ВА57-31 (Курский электроаппаратный завод), NSX100 TM-D (Schneider Electric), DPX3 160 (Legrand), Tmax XT1 TMD (ABB) показал, что базовые технические параметры автоматов близки по своим значениям. При этом установлено, что автоматические выключатели серии ВА57-31 имеют наименьшее значение потерь мощности на полюс (7,5 Вт), а автоматы серии Tmax XT1 TMD – наибольшее значение (10 Вт). Таким образом, в условиях эксплуатации оборудования наименьшая величина потерь мощности и количества электроэнергии характерна для низковольтных электрических сетей с установленными автоматическими выключателями серии ВА57-31, а наибольшее значение потерь отмечается во внутрицеховых системах с установленными автоматическими выключателями Tmax XT1 TMD. С использованием каталожных данных установлены зависимости потерь активной мощности в автоматических выключателях от номинальных токов; разработаны алгоритмы и проведено моделирование полученных зависимостей с помощью аппроксимирующих функций; вычислено среднеквадратическое отклонение составленных аппроксимирующих функций. В ходе исследования определены аналитические выражения динамики потерь мощности на полюс в рассматриваемых автоматах в функции от номинального тока и представлены графические зависимости исследуемых параметров низковольтной аппаратуры. Разработанные модели рекомендуется использовать для повышения достоверности оценки и уточнения величины потерь активной мощности и электроэнергии в электрических сетях низкого напряжения систем электроснабжения промышленных предприятий, агротехнических комплексов, объектов коммунально-бытового сектора.

Грачева Е. И. и др. Алгоритмы и модели потерь мощности в автоматических выключателях, устанавливаемых в цеховых сетях. Вестник МГТУ. 2020. Т. 23, № 4. С. 345–353. DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-345-353

## Algorithms and models of power losses in circuit breakers installed in networks

Elena I. Gracheva\*, Alexey N. Gorlov, Alsu N. Alimova

\*Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia;  
Southwestern State University, Kursk, Russia;  
e-mail: grachieva.i@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

Article info

Received  
16.07.2020

Key words:

circuit breakers, rated current, contact connections, approximating functions, design features

Abstract

Determination of the main characteristics of the topology and technical condition of equipment under operating conditions is necessary for analyzing and assessing power and electricity losses in intrashop low-voltage industrial power supply networks. A comparative analysis of the technical characteristics of automatic circuit breakers VA57-31 (KEAZ), NSX100 TM-D (Schneider Electric), DPX3 160 (Legrand), Tmax XT1 TMD (ABB) has shown that the main technical parameters of the machines are close in their values. At that it has been found out that automatic switches of the BA57-31 series have the lowest value of power losses per pole (7.5 W), whereas the automatic switches of the Tmax XT1 TMD series have the highest value (10 W). Thus, under the operating conditions of the equipment, the lowest value of power and electricity losses is characteristic of low-voltage electrical networks with installed circuit breakers of the BA57-31 series, and the highest value of losses is noted in in-shop systems with installed circuit breakers Tmax XT1 TMD. Using catalog data, the dependences of active power losses in circuit breakers on rated currents have been established; the algorithms have been developed and the obtained dependences have been modeled using approximating functions. The standard deviation of the compiled approximating functions has been calculated. Analytical expressions of the dynamics of power losses per pole have been determined as a function of the rated current. The graphical dependences of the investigated parameters of low-voltage equipment have been presented. The developed models are recommended to be used to increase the reliability of the assessment and refinement of the amount of active power and electricity losses in low-voltage electrical networks of industrial power supply systems, agrotechnical complexes, and enterprises of the public utility sector.

For citation

Gracheva, E. I. et al. 2020. Algorithms and models of power losses in circuit breakers installed in networks. *Vestnik of MSTU*, 23(4), pp. 345–353. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2020-23-4-345-353

## Введение

Повышение эффективности систем передачи электроэнергии требует детального анализа работы электрических сетей низкого напряжения, выявления очагов наибольших потерь, разработки способов модернизации и внедрения энергосберегающих мероприятий (*Зорин и др., 2015*).

В современных условиях для развития электротехнических комплексов необходимо увеличение произведенной электроэнергии при ужесточении контроля эффективности ее использования. Потери электроэнергии в процессе ее производства и потребления являются составной частью общего расхода электроэнергии.

Величина потерь мощности и количества электроэнергии существенно влияет на эффективность эксплуатации электрических сетей. Стоимость потерь входит в состав как общей расчетной стоимости (приведенных затрат), так и себестоимости (годовых эксплуатационных расходов) процессов передачи и распределения электроэнергии. Доля потерь в общей стоимости процесса передачи электроэнергии имеет значительную величину (35–45 %), поэтому для энергоэффективной эксплуатации систем внутривозовского электроснабжения следует поддерживать рациональное соотношение между стоимостью потерь и стоимостью общего расхода электроэнергии (*Клеев и др., 2017*).

В настоящее время изменяются требования к учету потерь мощности и количества электроэнергии во внутрицеховых системах электроснабжения. Эти изменения обусловлены сложностью определения параметрических и режимных данных систем электроснабжения. Достоверность информации об элементах электрооборудования значительно повышает энергоэффективность эксплуатации систем электроснабжения (*Муратаева и др., 2018*).

## Материалы и методы

В процессе эксплуатации промышленных электротехнических комплексов наблюдаются тенденции как увеличения, так и уменьшения расхода электроэнергии. Применение автоматизации производственных процессов, замена в технологических циклах пара на электроэнергию способствуют росту потребления электроэнергии; использование систем "умные сети", "интеллектуальных счетчиков", энергосберегающих технологий приводит к уменьшению расхода электроэнергии. При этом актуальной задачей становится разработка новых подходов к поиску резерва экономии электроэнергии на основе повышения достоверности информации о потерях мощности и электроэнергии в элементах систем внутрицехового электроснабжения.

К структуре и оборудованию внутрицехового электроснабжения предъявляются требования энергоэффективности и максимальной экономичности. Большое значение приобретают разработка алгоритмов оценки технических параметров низковольтного электрооборудования и применение методов прямого поиска оптимума. В основу решения поставленных задач должны быть положены аналитические зависимости между приведенными затратами на электроснабжение и передаваемую мощность (*Гайбов и др., 2018*). Для рационального регулирования режимов электропотребления необходимо повышение точности прогнозирования электропотребления и выявления основных факторов, от которых зависит величина расхода электроэнергии с учетом уровня потерь во всех элементах системы электроснабжения.

Топология внутрицеховых низковольтных сетей промышленного электроснабжения определяется протяженностью, разветвленностью и значительным количеством коммутационной аппаратуры низкого напряжения (*Власюк и др., 2018*). Поэтому для анализа и оценки потерь мощности и количества электроэнергии в электрических сетях низкого напряжения необходимы данные о величине потерь в контактных соединениях низковольтных электрических аппаратов, существенно влияющей на уровень общих потерь (*Егоров и др., 2018*).

Низковольтные коммутационные электрические аппараты характеризуются, как правило, сложностью конструкции. Эффективность функционирования аппаратов определяется их надежностью и качеством эксплуатации.

Автоматические выключатели предназначены для работы с длительным замкнутым состоянием контактов, что определяет необходимость стабильного уровня величины сопротивлений контактных групп аппаратов.

Для повышения эффективности функционирования электрооборудования внутрицеховых систем электроснабжения целесообразно осуществлять достоверный анализ элементов оборудования цеховых сетей и факторов, определяющих показатели процесса работы (*Колодяжный, 2016; Муханов и др., 2015*). При этом проведение детального анализа требуется для такой технической характеристики, как потери активной мощности в коммутационной аппаратуре низкого напряжения. Величины потерь мощности и потребляемой мощности в низковольтных коммутационных аппаратах зависят от следующих факторов (*Родионов, 2019; Варнавский и др., 2016*):

- значения номинального тока электрического аппарата,  $A$ ;
- формы и размеров контакта, определяемых номинальным током, структурой контактных групп, ресурсом аппарата и числом циклов включения-отключения;
- материала контактных деталей;
- сечений токопроводящих частей аппарата.

Рассмотрим литые автоматы, пользующиеся наибольшей популярностью на отечественном рынке электрооборудования.

Автоматический выключатель в литом корпусе – это коммутационный аппарат, предназначенный для проведения тока в нормальном режиме, защиты оборудования и силовой цепи при возникновении перегрузки или короткого замыкания<sup>1</sup>.

Основные технические каталожные данные автоматов, выпускаемых Курским электроаппаратным заводом и зарубежными производителями Schneider Electric (Франция), Legrand (Франция), ABB (Швейцария), представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные технические каталожные данные автоматов  
Table 1. Basic technical characteristics of machines

Тип и завод-изготовитель автоматического выключателя	Значение потерь активной мощности на полюс, Вт	Коммутационная износостойкость, циклов	Механическая износостойкость, циклов	Габаритные размеры (Ш × В × Г), мм	$I_{ном}$ , А	$U_{ном}$ , В
BA57-31 (Курский электроаппаратный завод)	7,5	10 000	16 000	75 × 125 × 117	100	690АС
NSX100 TM-D (Schneider Electric)	8,8	10 000	50 000	140 × 160 × 86	100	690АС
DPX <sup>3</sup> 160 с термомагнитным расцепителем (Legrand)	7,8	8 000	25 000	81 × 115 × 100	100	690АС
Tmax XT1 TMD (ABB)	10	8 000	25 000	76,2 × 130 × 70	100	690АС

Анализ данных табл. 1 показал, что основные технические параметры автоматических выключателей рассматриваемых заводов-изготовителей имеют близкие значения. При этом необходимо отметить, что автоматические выключатели серии BA57-31 имеют наименьшее значение потерь мощности на полюс (7,5 Вт), а автоматы Tmax XT1 TMD – наибольшее значение (10 Вт). Следовательно, в процессе работы наименьшие потери мощности будут иметь место в цеховых сетях низкого напряжения с автоматическими выключателями BA57-31, а наибольшее – с автоматами Tmax XT1 TMD.

В зависимости от номинального тока аппарата его потери мощности будут различными. По каталожным данным построим зависимости потерь мощности от номинального тока  $I$  (рис. 1) для автоматических выключателей (BA57-31, NSX100 TM-D, DPX<sup>3</sup> 160, Tmax XT1 TMD).

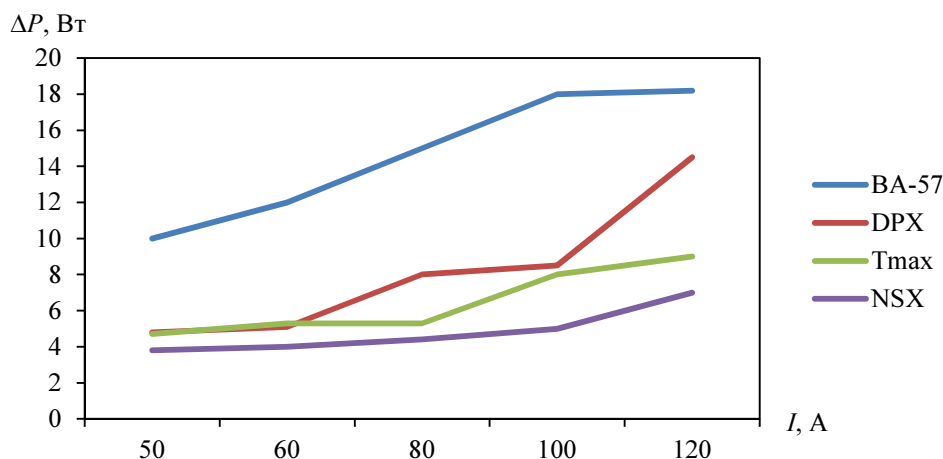


Рис. 1. Графики зависимостей потерь активных мощностей в функции номинальных токов автоматов различных заводов-изготовителей

Fig. 1. Dependency graphs of active power losses as a function of rated currents of automatic machines of different manufacturers

<sup>1</sup>ГОСТ ИЕС 60050-441-2015. Международный электротехнический словарь. Часть 441. Аппаратура коммутационная, аппаратура управления и плавкие предохранители. М., 2016.

В нормативной документации по низковольтным электрическим аппаратам ВА57-31, NSX100 TM-D, DPX<sup>3</sup> 160, Tmax XT1 TMD, как правило, не указываются достоверные данные о сопротивлениях контактов и потерях мощности в контактных системах, вследствие чего актуальными задачами являются детальный анализ и выявление функциональных зависимостей динамики величины потерь активной мощности от основных технических характеристик (Ионцева и др., 2015).

Аппроксимируем полученные графические зависимости величины потерь мощности в функции номинального тока (Feizifar et al., 2019; Lei et al., 2017; Safin et al., 2019).

График функции для автоматического выключателя ВА57-31 можно представить следующими функциями:

$$\begin{aligned} F_{1BA}(I) &= -1,95 + 0,28I - 7,4 \cdot 10^{-4} I^2, \\ F_{2BA}(I) &= 20,26 - 37,95e^{-0,025I}, \\ F_{3BA}(I) &= -4,12 + 143,98e^{-0,1I} - 8,4 \cdot 10^{-4} I^2 + 0,31I, \end{aligned}$$

где  $F_{1BA}(I)$ ,  $F_{2BA}(I)$ ,  $F_{3BA}(I)$  – функциональные зависимости значений потерь активной мощности в автомате ВА-57 от величины номинального тока;  $I$  – величина номинального тока ВА-57.

Графические зависимости  $F_{1BA}(I)$ ,  $F_{2BA}(I)$ ,  $F_{3BA}(I)$  показаны на рис. 2.

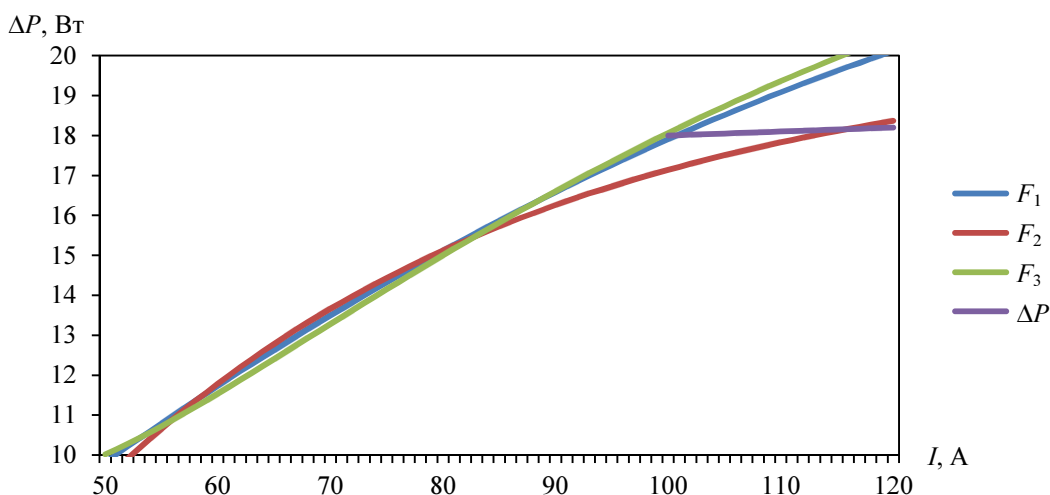


Рис. 2. Графические функциональные аппроксимирующие характеристики  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  для ВА57-31

Fig. 2. Graphic functional approximating characteristics  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  for BA57-31 automatic machine

Определим аппроксимирующие функции зависимостей величины потерь мощности от значений номинальных токов автоматов NSX100 TM-D, DPX<sup>3</sup> 160, Tmax XT1 TMD.

Аппроксимирующую функцию можно представить следующими выражениями:

– для автоматического выключателя NSX100 TM-D:

$$\begin{aligned} F_{1NSX}(I) &= 0,78 + 0,11I - 1,23 \cdot 10^{-4} I^2, \\ F_{2NSX}(I) &= 29,42 - 29,18e^{-4,001 \cdot 10^{(-3)} I}, \\ F_{3NSX}(I) &= 17 - 1\,067e^{-0,1I} + 5,97 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,14I; \end{aligned}$$

– автоматического выключателя DPX<sup>3</sup> 160:

$$\begin{aligned} F_{1DPX}(I) &= 7,46 - 0,13I + 0,15 \cdot 10^{-4} I^2, \\ F_{2DPX}(I) &= 2,23 \cdot 10^6 - 2,23 \cdot 10^6 e^{-6,298 \cdot 10^{(-8)} I}, \\ F_{3DPX}(I) &= 20,37 - 516,21e^{-0,1I} + 0,28 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,39I; \end{aligned}$$

– автоматического выключателя Tmax XT1 TMD:

$$\begin{aligned} F_{1Tmax}(I) &= -0,55 + 0,12I - 2,95 \cdot 10^{-4} I^2, \\ F_{2Tmax}(I) &= 13,97 - 15,34e^{-9,692 \cdot 10^{(-3)} I}, \\ F_{3Tmax}(I) &= 5,48 - 241,05e^{-0,1I} + 2,94 \cdot 10^{-4} I^2 - 4,65 \cdot 10^{-3} I, \end{aligned}$$

где  $F_1(I)$ ,  $F_2(I)$ ,  $F_3(I)$  – функциональные зависимости значений потерь активной мощности в автоматах NSX100 TM-D, DPX<sup>3</sup> 160, Tmax XT1 TMD от величины номинального тока;  $I$  – величина номинального тока.

Графические зависимости  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  для автоматов NSX100 TM-D, DPX<sup>3</sup> 160, Tmax XT1 TMD показаны на рис. 3–5.

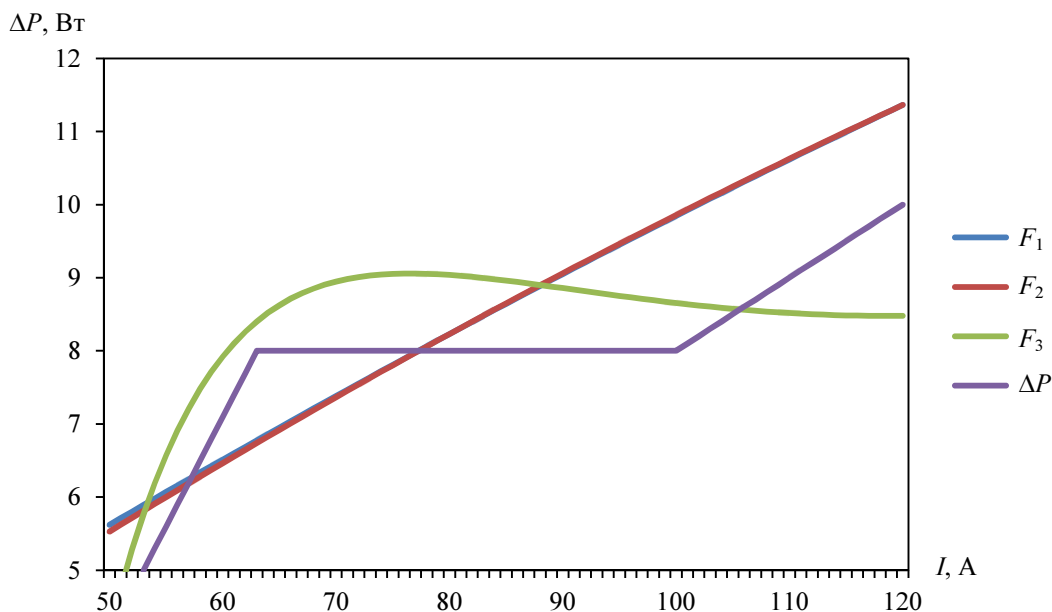


Рис. 3. Графические функциональные аппроксимирующие характеристики  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  для NSX100 TM-D

Fig. 3. Graphic functional approximating characteristics  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  for NSX100 TM-D automatic machine

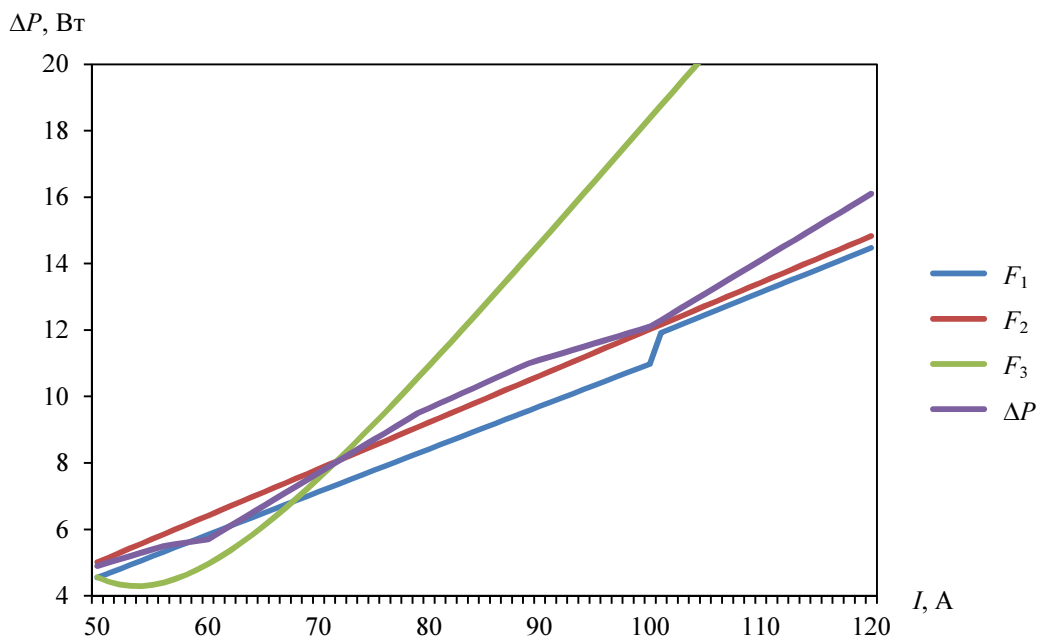


Рис. 4. Графические функциональные аппроксимирующие характеристики  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  для DPX<sup>3</sup> 160

Fig. 4. Graphic functional approximating characteristics  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  for DPX<sup>3</sup> 160 automatic machine

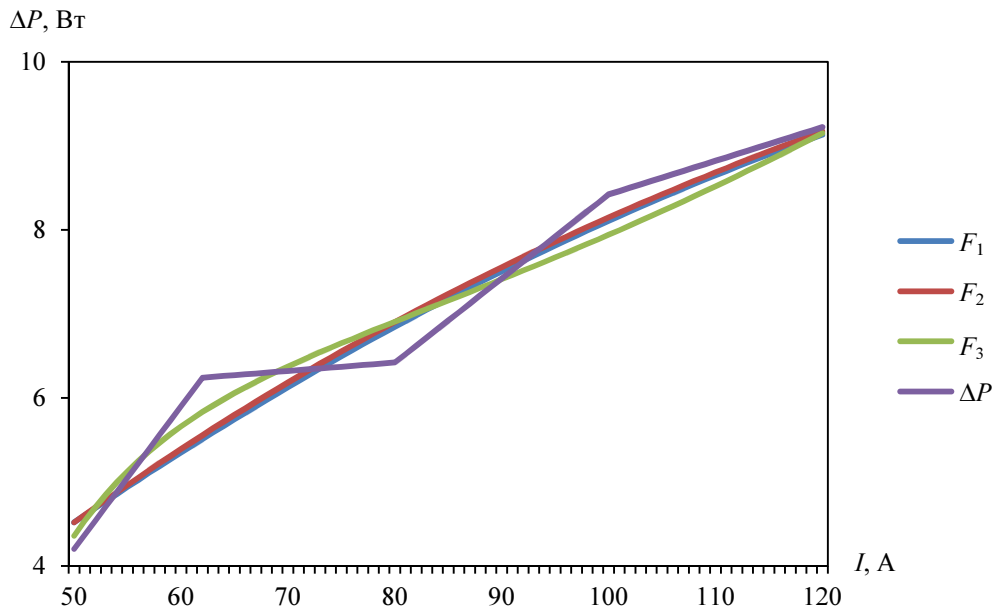


Рис. 5. Графические функциональные аппроксимирующие характеристики  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  для Tmax XT1 TMD

Fig. 5. Graphic functional approximating characteristics  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  for Tmax XT1 TMD automatic machine

Определим среднеквадратическое отклонение полученных функций от паспортных данных по выражению

$$S = \sqrt{\sum (F(I_i) - \Delta P_i)^2},$$

где  $F(I_i)$  – значение полученной функции при заданной величине номинального тока;  $\Delta P_i$  – паспортная величина активных потерь.

### Результаты и обсуждение

В процессе исследования определены зависимости изменения потерь мощности на полюс от номинального тока – аппроксимирующие функции, имеющие наименьшее среднеквадратическое отклонение (табл. 2).

Таблица 2. Результаты расчета величины  $S = \sqrt{\sum (F(I_i) - \Delta P_i)^2}$  для исследуемых автоматов

Table 2. Results of calculating the value  $S = \sqrt{\sum (F(I_i) - \Delta P_i)^2}$  for automatic machines under study

Вид функции аппроксимации	$S$
<b>BA57-31</b>	
$F_{1BA}(I) = -1,94 + 0,27I - 7,35 \cdot 10^{-4} I^2$	0,38
$F_{2BA}(I) = 20,26 - 37,95e^{-0,025I}$	0,14
$F_{3BA}(I) = -4,12 + 143,97e^{-0,1I} - 8,32 \cdot 10^{-4} I^2 + 0,31I$	1,15
<b>NSX100 TM-D</b>	
$F_{1NSX}(I) = 0,78 + 0,11I - 1,23 \cdot 10^{-4} I^2$	2,65
$F_{2NSX}(I) = 29,42 - 29,18e^{-4,001 \cdot 10^{(-3)} I}$	0,37
$F_{3NSX}(I) = 16,94 - 1067e^{-0,1I} + 5,96 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,14I$	2,63
<b>DPX<sup>3</sup> 160</b>	
$F_{1DPX}(I) = 7,46 - 0,13I + 0,15 \cdot 10^{-4} I^2$	1,46
$F_{2DPX}(I) = 2,23 \cdot 10^6 - 2,23 \cdot 10^6 e^{-6,298 \cdot 10^{(-8)} I}$	1,16
$F_{3DPX}(I) = -20,37 + 516,21e^{-0,1I} + 0,28 \cdot 10^{-4} I^2 - 0,39I$	7,76

Tmax XT1 TMD	
$F_{1T_{\max}}(I) = -0,55 + 0,12I - 2,95 \cdot 10^{-4} I^2$	0,81
$F_{2T_{\max}}(I) = -13,97 + 15,34e^{-9,692 \cdot 10^{(-3)} I}$	0,69
$F_{3T_{\max}}(I) = -241,05e^{-0,1I} + 2,94 \cdot 10^{-4} I^2 - 4,65 \cdot 10^{-3} I + 5,48$	0,80

На рис. 6 приведены графики изменения потерь мощности для автоматических выключателей с нагрузкой по току  $0,5I_{\text{ном}}$ .

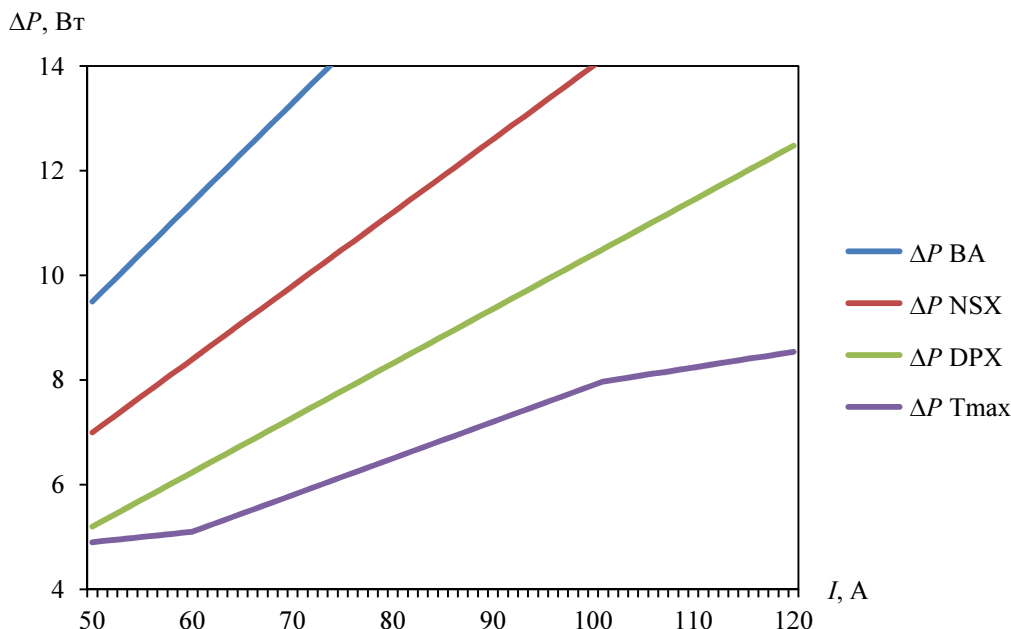


Рис. 6. Графические функциональные характеристики  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  для автоматов BA57-31, NSX100 TM-D, DPX<sup>3</sup> 160, Tmax XT1 TMD

Fig. 6. Graphic functional characteristics  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$  for automatic machines BA57-31, NSX100 TM-D, DPX<sup>3</sup> 160, Tmax XT1 TMD

### Закключение

В процессе исследования автоматических выключателей отечественных и зарубежных производителей низковольтной аппаратуры (Курского электроаппаратного завода, Schneider Electric, Legrand и ABB) в соответствии с паспортными данными разработаны функциональные зависимости активных потерь от номинального тока  $\Delta P = F(I_{\text{ном}})$ ; составлены алгоритмы и аппроксимирующие функции данных характеристик и вычислена величина среднеквадратических отклонений полученных функций от паспортной величины активных потерь; определены зависимости изменения потерь мощности в автоматических выключателях от номинального тока – аппроксимирующие функции, имеющие наименьшее среднеквадратическое отклонение.

Сравнительный анализ технических характеристик автоматов BA57-31, NSX100 TM-D, DPX<sup>3</sup> 160, Tmax XT1 TMD показал, что их основные параметры имеют близкие значения, однако наблюдаются различия в величинах потерь активной мощности на полюс аппарата. Наиболее энергоэффективными по потерям активной мощности являются аппараты серии BA57-31 с наименьшей величиной потерь активной мощности на полюс (7,5 Вт). Системы внутрицехового электроснабжения крупных промышленных комплексов имеют в своем составе десятки тысяч единиц низковольтных электрических аппаратов, поэтому при оценке и анализе уровня потерь мощности и количества электроэнергии в таких системах целесообразно учитывать влияние электрической аппаратуры для повышения точности и достоверности данных о потерях.

### Благодарности

Публикация выполнена при финансовой поддержке государственного задания Министерства высшего образования и науки Российской Федерации, проект № 0851-2020-0032 "Исследование алгоритмов, моделей и методов повышения эффективности функционирования сложных технических систем".

### Библиографический список

- Варнавский К. А., Матвеев В. Н. Анализ путей повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения промышленных предприятий // *Промышленная энергетика*. 2016. № 4. С. 14–18.
- Власюк И. В., Парамонов С. Ю., Белов С. И. Повышение эксплуатационной надежности автоматических выключателей в сетях напряжением 0,4 кВ, используемых в агропромышленном комплексе // *Международный технико-экономический журнал*. 2018. № 1. С. 51–58.
- Гайбиров Т. Ш., Эшонкулов Э. Б., Айтбаев Н. А. Эквивалентность поиска оптимальных значений регулируемых параметров при минимизации потерь мощности в электрических сетях // *Точная наука*. 2018. № 31. С. 15–18.
- Егоров Е. Г., Иванова С. П., Луия Н. Ю., Афанасьев А. В. [и др.]. Исследование отключающей способности автоматических выключателей в режиме короткого замыкания // *Электротехника*. 2018. № 8. С. 12–15.
- Зорин В. В., Буйный Р. А., Перепеченый В. А. Модели и методы расчета и оценки потерь мощности и электрической энергии в распределительных сетях 0,38 кВ // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2015. № 5(136). С. 19–27.
- Ионцева О. А., Анчарова Т. В. Проектирование и эксплуатация внутривоздушных низковольтных сетей промышленных предприятий // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. 2015. № 6. С. 45–50.
- Клеев Ю. В., Муромцев А. А., Пирожков М. С. Потери активной мощности в электрических сетях и пути их снижения // *Academy*. 2017. № 8(23). С. 16–19.
- Колодяжный В. В. Возможности современных автоматических выключателей // *Энергетические установки и технологии*. 2016. Т. 2, № 1. С. 43–49.
- Муратаева Г. А., Муратаев И. А., Сабитов С. Е., Усенкулов Т. С. Метод оптимизации режима электрической сети для снижения потерь мощности // *Вестник современных исследований*. 2018. № 5.1 (20). С. 476–479.
- Муханов А. В., Муханов В. В. Исследование автоматических выключателей с тепловым расцепителем и расцепителем максимального тока // *Строительство и архитектура-2015. Градостроительство и планирование территориального развития: материалы междунар. студ. науч.-практ. конф., Ростов-на-Дону, 26–27 ноября 2015 г. Ростов-на-Дону : РИСИ, 2015. С. 51–52.*
- Родионов И. В. Исследование моделей автоматических выключателей при реализации различных схем автоматического ввода резерва // *XXV Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и электроэнергетика" : тез. докл., Москва, 14–15 марта 2019 г. М. : НИУ МЭИ, 2019. С. 366.*
- Feizifar B., Usta Ö. A new failure protection algorithm for circuit breakers using the power loss of switching arc incidents // *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*. 2019. Vol. 27, Iss. 3. P. 1982–1997. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.
- Lei C., Tian W., Zhang Y., Fu R. [et al.]. Probability-based circuit breaker modeling for power system fault analysis // *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa, FL, USA, 2017. P. 979–984. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec.2017.7930815>.
- Safin A. R., Khusnutdinov R. R., Kopylov A. M. The method topological optimization for design linear electric machines // *International Science and Technology Conference "EastConf" : Proceedings of a meeting held 1–2 March 2019, Vladivostok, Russia. IEEE, 2019. P. 134–139.*

### References

- Varnavsky, K. A., Matveev, V. N. 2016. Analysis of ways to improve the efficiency of operation of power supply systems of industrial enterprises. *Industrial Energy*, 4, pp. 14–18. (In Russ.)
- Vlasyuk, I. V., Paramonov, S. Yu., Belov, S. I. 2018. Increasing the operational reliability of circuit breakers in 0.4 kV networks used in the agro-industrial complex. *The International Technical-Economic Journal*, 1, pp. 51–58. (In Russ.)
- Gayibov, T. Sh., Eshonkulov, E. B., Aitbaev, N. A. 2018. Equivalence of the search for optimal values of controlled parameters while minimizing power losses in electrical networks. *Tochnaya nauka*, 31, pp. 15–18. (In Russ.)
- Egorov, E. G., Ivanova, S. P., Luiya, N. Yu., Afanas'ev, A. V. et al. 2018. Investigation of the breaking capacity of automatic switches in short circuit mode. *Russian Electrical Engineering*, 8, pp. 12–15. (In Russ.)
- Zorin, V. V., Buiny, R. A., Perepecheny, V. A. 2015. Models and methods for calculating and assessing power and electrical energy losses in distribution networks of 0.38 Kv. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*, 5(136), pp. 19–27. (In Russ.)
- Iontseva, O. A., Ancharova, T. V. 2015. Design and operation of in-plant low-voltage networks of industrial enterprises. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 6, pp. 45–50. (In Russ.)
- Kleev, Yu. V., Muromtsev, A. A., Pirozhkov, M. S. 2017. Losses of active power in electrical networks and ways to reduce them. *Academy*, 8(23), pp. 16–19. (In Russ.)



- Kolodyazhny, V. V. 2016. Possibilities of modern automatic switches. *Energeticheskiye ustanovki i tekhnologii*, 2(1), pp. 43–49. (In Russ.)
- Murataeva, G. A., Murataev, I. A., Sabitov, S. E., Usenkulov, T. S. 2018. The method of optimization of the electric network mode to reduce power losses. *Vestnik sovremennykh issledovaniy*, 5.1(20), pp. 476–479. (In Russ.)
- Mukhanov, A. V., Mukhanov, V. V. 2015. Investigation of circuit breakers with a thermal release and an overcurrent release. Proceedings of Intern. conf. *Construction and Architecture – 2015*, 26–27 November 2015. Rostov n/D, pp. 51–52. (In Russ.)
- Rodionov, I. V. 2019. Investigation of models of circuit breakers in the implementation of various schemes for automatic transfer of reserve. Proceedings of XXV Intern. conf. *Radio electronics, electrical engineering and power engineering*, 14–15 March 2019. Moscow, pp. 366. (In Russ.)
- Feizifar, B., Usta, Ö. 2019. A new failure protection algorithm for circuit breakers using the power loss of switching arc incidents. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 27(3), pp. 1982–1997. DOI: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.
- Lei, C., Tian, W., Zhang, Y., Fu, R. et al. 2017. Probability-based circuit breaker modeling for power system fault analysis. *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Tampa, FL, USA, pp. 979–984. DOI: <https://doi.org/10.1109/apec.2017.7930815>.
- Safin, A. R., Khusnutdinov, R. R., Kopylov, A. M. 2019. The method topological optimization for design linear electric machines. Proceedings of Intern. Science and Technology Conference *EastConf*, 1–2 March 2019, Vladivostok, pp. 134–139.

#### Сведения об авторах

**Грачева Елена Ивановна** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066;  
Казанский государственный энергетический университет, д-р техн. наук, профессор;

ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, Россия, 305040; Юго-Западный государственный университет;  
профессор; e-mail: [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

**Elena I. Gracheva** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Dr Sci. (Engineering), Professor;  
94, 50 Years of October Str., Kursk, Russia, 305040; South-West State University, Professor;  
e-mail: [grachieva.i@bk.ru](mailto:grachieva.i@bk.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5379-847X>

**Горлов Алексей Николаевич** – ул. 50 лет Октября, 94, г. Курск, Россия, 305040; Юго-Западный государственный университет, канд. техн. наук, доцент; e-mail: [alexjulia17@yandex.ru](mailto:alexjulia17@yandex.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-6162>

**Alexey N. Gorlov** – 94, 50 Years of October Str., Kursk, Russia, 305040; Southwestern State University, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor; e-mail: [alexjulia17@yandex.ru](mailto:alexjulia17@yandex.ru),  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6879-6162>

**Алимова Алсу Нюрхайдаровна** – ул. Красносельская, 51, г. Казань, Россия, 420066; Казанский государственный энергетический университет, магистрант; e-mail: [aan-678@rambler.ru](mailto:aan-678@rambler.ru)

**Alsu N. Alimova** – 51 Krasnoselskaya Str., Kazan, Russia, 420066; Kazan State Power Engineering University, Master's Student; e-mail: [aan-678@rambler.ru](mailto:aan-678@rambler.ru)