



АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВНУТРИЗАВОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Э.Ю. Абдуллазянов¹, Е.И. Грачева¹, А.Н. Горлов², З.М. Шакурова¹,
³Т.В. Табачникова, ⁴С. Валтчев

¹Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань, Россия

²Юго-Западный Государственный Университет, г. Курск, Россия

³Альметьевский государственный нефтяной институт, г. Альметьевск, Россия

⁴New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria

epp.kgeu@mail.ru,

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Исследование степени влияния характеристик внутривозводских электрических сетей на достоверность результатов в алгоритмах оценки эквивалентных сопротивлений. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи проведено исследование радиальной схемы электроснабжения участка инструментального цеха с вычислением и моделированием эквивалентных и эталонных значений сопротивлений схемы. Разработаны алгоритмы и методика оценки значений эквивалентных сопротивлений с учетом основных технических характеристик внутривозводских сетей. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Проанализированы данные вычислений значений эквивалентного сопротивления схем с оценкой фактора нагрева проводников и фактора сопротивлений контактных аппаратов. Выявлены доли влияния сопротивлений контактной аппаратуры и линий с учетом числа приемников электроэнергии, присоединенных к силовому пункту, на значение эквивалентных сопротивлений схемы. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* В статье разработаны алгоритмы оценки значений эквивалентных сопротивлений внутривозводских схем электроснабжения. Представлены номограммы, учитывающие число и длину линий схемы с выделением зоны учета сопротивлений контактной аппаратуры в эквивалентных сопротивлениях схем. Полученные алгоритмы и результаты рекомендуется использовать для уточнения величины потерь мощности и электрической энергии во внутривозводских сетях, что позволит повысить достоверность расчетов.

Ключевые слова: алгоритмы; модели; внутривозводские схемы; эквивалентное сопротивление; характеристики оборудования.

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».

Для цитирования: Абдуллазянов Э.Ю., Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М., Табачникова Т.В., Валтчев С. Алгоритмы оценки эквивалентных сопротивлений внутривозводских электрических сетей // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 4. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-3-13.

ALGORITHMS FOR ESTIMATING EQUIVALENT RESISTANCES OF IN-PLANT ELECTRICAL NETWORKS

EY. Abdullazyanov¹, EI. Grachieva¹, AN. Gorlov², ZM. Shakurova¹, TV. Tabachnikova
⁴Valtchev Stanimir

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

³Almetyevsk State Oil Institute, Almetyevsk, Russia

⁴New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria

epp.kgeu@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* Investigation of the degree of influence of the characteristics of in-plant electrical networks on the reliability of the results in the algorithms for estimating equivalent resistances. *METHODS.* When solving this problem, a study of the radial power supply scheme of the tool shop section was carried out with the calculation and modeling of equivalent and reference values of the circuit resistances. Algorithms and methods for estimating the values of equivalent resistances have been developed, taking into account the main technical characteristics of in-plant networks. *RESULTS.* The data of calculations of the equivalent resistance values of the circuits with an assessment of the heating factor of the conductors and the resistance factor of the contact devices are analyzed. The proportions of the influence of the resistances of the contact equipment and lines, taking into account the number of electric power receivers connected to the power point, on the value of the equivalent resistances of the circuit are revealed. *CONCLUSION.* The article develops algorithms for estimating the values of equivalent resistances of in-plant power supply circuits. Nomograms are presented that take into account the number and length of the circuit lines with the allocation of the zone of accounting for the resistances of contact equipment in the equivalent resistances of the circuits. The obtained algorithms and results are recommended to be used to clarify the amount of power and electrical energy losses in the intra-factory networks, which will increase the reliability of calculations.

Keywords: algorithms; models; in-plant circuits; equivalent resistance; equipment characteristics.

Acknowledgements: The publication was carried out with the financial support of the state task of the Ministry of Higher Education and Science of the Russian Federation, project No. 0851-2020-0032 «Research of algorithms, models and methods for improving the efficiency of complex technical systems».

For citation: Abdullazyanov EYu, Grachieva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM, Tabachnikova TV, Valtchev S. Algorithms for estimating equivalent resistances of in-plant electrical networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(4):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-4-3-13.

Введение

Внутризаводские системы электроснабжения промышленных объектов в настоящее время непрерывно развиваются. Модернизируется электрооборудование, разрабатываются новые виды продукции электротехнической промышленности, усложняются технологические процессы производств. Все это приводит к изменению топологической структуры внутризаводских электрических сетей. Вместе с тем возникает задача эффективного внедрения мероприятий по энергосбережению в связи с наблюдающимся ростом стоимости электроэнергии (ЭЭ) и электрооборудования. Рациональная топология схем внутризаводских сетей обеспечивает их качественную эксплуатацию. При этом точность информации о схемных и режимных параметрах оборудования позволяет разрабатывать вычислительные алгоритмы для определения основных технических характеристик систем электроснабжения.

Уровень потерь ЭЭ показывает, насколько энергоэффективной является система электроснабжения [2,7-12]. Достоверная оценка потерь ЭЭ требуется для корректного прогнозирования электропотребления промышленными предприятиями [3,13-16]. Для повышения достоверности расчетов потерь необходимы методики с высокой степенью точности [17-22]. Предлагаемые в настоящей работе алгоритмы вычисления эквивалентного сопротивления внутризаводских электрических сетей позволяют снизить погрешности расчетов вследствие учета наиболее значимых параметров электрооборудования [1-6].

Алгоритм метода расчета эквивалентных сопротивлений внутризаводских электрических сетей

Как известно, эквивалентное сопротивление внутризаводских электрических сетей - это определяющая характеристика оценки уровня потерь ЭЭ [1-6].

Проведенные исследования показали, что значение эквивалентного сопротивления линии схемы включает в себя 2 параметра: сопротивление линии и сопротивление контактных аппаратов [1]:

$$R_{\text{общ.лин.}}(t) = R_{20} \cdot L \left[1 + \alpha(\Theta_{\text{пр}} - 20^0) \right] + \sum_{i=1}^k R_{ika}, \quad (1)$$

где R_{20} - значение сопротивления одного метра провода или кабеля при температуре 20^0C , Ом/м; α - значение коэффициента приращения величины сопротивления проводника, для меди равно $0,00441/^0\text{C}$, для алюминия $0,00421/^0\text{C}$ [1].

Температура нагрева токопроводящих жил:

Таблица 1

Характеристики электрооборудования участка механического цеха

Наименование электроприемников	Номер линии на схеме	Мощность приемника $P_n, \text{кВт}$	Расчетный ток в линии $I_p, \text{А}$	Допустимый длительный ток $I_{\text{доп}}, \text{А}$	Кабель			Удельное сопротивление провода $r_0, \text{МОм/м}$	Число автоматов приемников электроэнергии	Количество пускателей электромагнитных приемников электроэнергии	Коэффициент загрузки линии, k_z
					Марка	Сечение, мм^2	Длина, м				
1. Настольный сверлильный станок	Л1	0,54	2,89	19	ВВГнг-LS	5x1,5	17,3	12,3	1	1	0,15
2в. Универсально-фрезерный станок	Л12	3,75	13,41	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,6	12,3	1	1	0,71
2г. Универсально-фрезерный станок	Л11	1,5	6,00	19	ВВГнг-LS	5x1,5	14,4	12,3	1	1	0,32
3а. Токарный станок	Л4	0,6	2,57	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,8	12,3	1	1	0,14
3б. Токарный станок	Л3	0,55	2,35	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,1	12,3	1	1	0,12
3в. Токарный станок	Л2	0,75	3,17	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,4	12,3	1	1	0,17
3г. Токарный станок	Л9	0,75	3,17	19	ВВГнг-LS	5x1,5	14,0	12,3	1	1	0,17
5а. Компрессорная установка	Л5	4	8,22	19	ВВГнг-LS	5x1,5	17,0	12,3	1	1	0,44
5б. Компрессорная установка	Л10	5,6	11,18	19	ВВГнг-LS	5x1,5	13,8	12,3	1	1	0,59
6. Настольный сверлильный станок	Л8	4	21,40	26	ВВГнг-LS	5x2,5	14,8	7,4	1	1	0,82
2а. Универсально-фрезерный станок	Л13	2,2	8,05	19	ВВГнг-LS	5x1,5	17,2	12,3	1	1	0,42
2б. Универсально-фрезерный станок	Л7	1,5	5,56	19	ВВГнг-LS	5x1,5	20,5	12,3	1	1	0,29
4. Настольный сверлильный станок	Л6	5	26,75	34	ВВГнг-LS	5x4	18,7	4,63	1	1	0,80
7а. Вентиляционная установка	Л14	0,78	1,99	19	ВВГнг-LS	5x1,5	22,5	12,3	1	1	0,11
7б. Вентиляционная установка	Л15	2,2	4,86	19	ВВГнг-LS	5x1,5	16,7	12,3	1	1	0,27
8. Кран-балка электрическая опорная грузоподъемность 16 т	Л16	3,13	12,80	19	ВВГнг-LS	5x1,5	15,7	12,3	1	1	0,68
Итого по силовому пункту 1:		26,9	40,91	45	ВВГнг-LS	5x6	16,4	3,0	1	-	0,92

Результаты расчетов сопротивления линий приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты вычислений сопротивлений радиальных линий с учетом различных параметров оборудования при поэлементном расчете

Линия на схеме	Сопротивление линий при неучете нагрева, мОм	Сопротивление линий при учете нагрева, мОм	Сопротивление установленных автоматов, мОм	Сопротивление пускателей электромагнитных, мОм	Общее сопротивление, мОм
Л1	212,9	213,9	116,34	82,51	412,76
Л12	191,8	212,4	21,82	51,57	285,79
Л11	177,2	180,8	43,64	82,51	306,95
Л4	194,4	195,2	116,34	82,51	394,05
Л3	185,8	186,4	116,34	82,51	385,31
Л2	189,4	190,5	87,25	82,50	360,30
Л9	171,0	172,0	87,25	82,50	341,74
Л5	207,9	216,2	34,90	83	333,59
Л10	169,7	182,3	21,81	52	255,67
Л8	109,5	125,4	12,28	33	170,68
Л13	211,6	219,7	34,90	82,50	337,10
Л7	252,2	256,8	58,17	82,50	397,44
Л6	86,1	97,5	10,91	26	134,21
Л14	275,5	276,2	174,50	82,50	533,16
Л15	204,2	207,0	58,17	82,50	347,70
Л16	191,9	210,4	21,81	51,56	283,79
СП-1	50,4	59,3	6,14	-	65,41

На рисунке 2 показаны выявленные в величине эквивалентного сопротивления схемы доли сопротивлений контактной аппаратуры и кабелей в зависимости от числа приемников электроэнергии, присоединенных к силовому пункту.

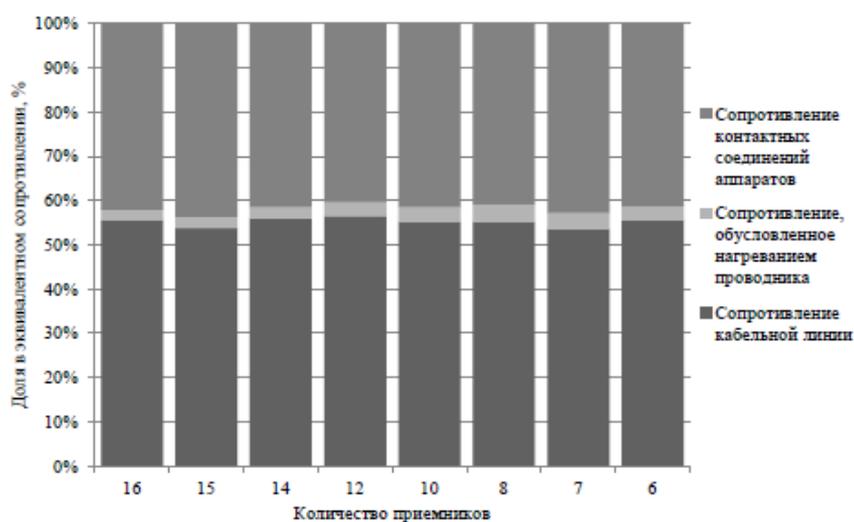


Рис. 2. Значения в процентах сопротивлений контактной аппаратуры и кабелей с учетом их нагрева в величине эквивалентного сопротивления схемы

Fig. 2. Values as a percentage of the resistances of contact equipment and cables, taking into account their heating, in the value of the equivalent resistance of the circuit

На рисунке 3 показана динамика вариации эквивалентного сопротивления схемы (рис.1) при влиянии:

- нагрева кабелей;
- сопротивлений контактной аппаратуры;
- загрузки кабелей.

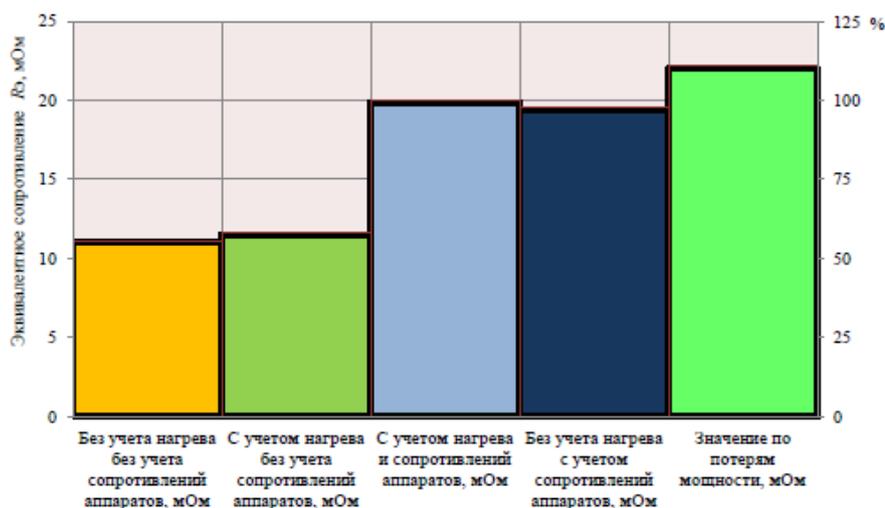


Рис. 3. Возможная вариация эквивалентного сопротивления схемы

Детальный анализ факторов, определяющих эквивалентное сопротивление схем, показал целесообразность учета нагревания токопроводящих жил кабелей и проводов, сопротивления контактной аппаратуры и среднеквадратичного коэффициента загрузки кабелей и проводов, что повышает достоверность оценки уровня потерь электрической энергии в системах внутриводского электроснабжения.

Обсуждение результатов

В таблице 3 показаны результаты вычислений значений эквивалентного сопротивления схемы по выражению (4) и погрешностей расчетов, обусловленных неучетом нагревания токопроводящих жил кабелей и сопротивлений контактной аппаратуры, при различном числе присоединенных к силовому пункту электропотребителей.

Таблица 3

Результаты вычислений значения эквивалентного сопротивления схемы при различном числе присоединенных электропотребителей

Число электропотребителей	При учете нагревания кабелей (проводов) и сопротивлений контактной аппаратуры	Без учета нагревания кабелей (проводов) и сопротивлений контактной аппаратуры	Величина погрешности вычислений $R_{эквив}$ %
	$R_{эквив}$		
16	19,85	11,01	-45
14	22,38	12,52	-44
12	24,38	13,78	-43
10	27,88	15,36	-45
8	33,26	18,37	-45
6	51,17	28,47	-44

Значение эквивалентного сопротивления схемы, если не учитывать величину сопротивлений контактной аппаратуры, вычисляется как [1]:

$$R_{эквив} = \frac{\sum_{i=1}^n R_{i,20} \cdot L_i}{n} \left[1 + \alpha(\Theta_{i,пров} - 20^0) \right] \quad (5)$$

где n – число электроприемников.

Проведенные исследования доказали целесообразность учета сопротивлений контактной аппаратуры для схем радиальной топологии со следующей вариацией диапазонов технических характеристик:

- число кабелей (к приемникам электроэнергии)- от четырех до двенадцати;

- длина кабелей - от пяти до двухсот метров;
- сечение кабелей - от 2,5 мм² до 240 мм²;
- число контактной аппаратуры, установленной на кабельной линии:
 - 1) один автомат;
 - 2) один автомат + один пускатель электромагнитный;
 - 3) два автомата + один пускатель электромагнитный.

Результаты выявленных зон целесообразности учета сопротивлений контактной аппаратуры приведены на рисунках 4-8, где АВ – автоматический выключатель, МП – пускатель электромагнитный.

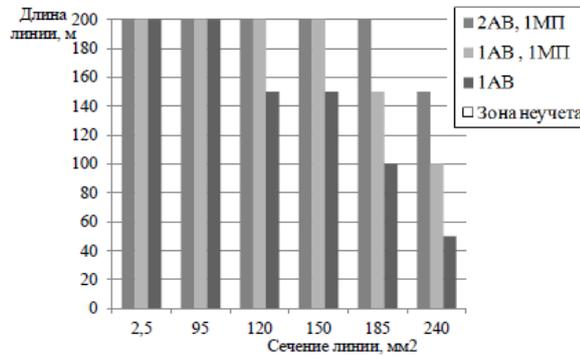


Рис. 4. Зона учета сопротивлений контактной аппаратуры при определении эквивалентного сопротивления схемы с 4 кабелями

Fig. 4 The zone of accounting for the resistances of contact equipment when determining the equivalent resistance of a circuit with 4 cables

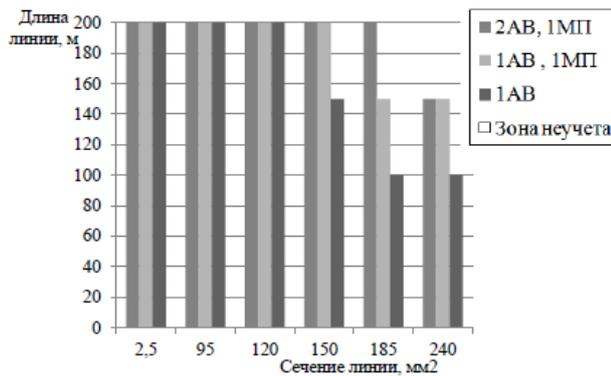


Рис. 5. Зона учета сопротивлений контактной аппаратуры при определении эквивалентного сопротивления схемы с 6 кабелями

Fig. 5 The zone of accounting for the resistances of contact equipment when determining the equivalent resistance of a circuit with 6 cables

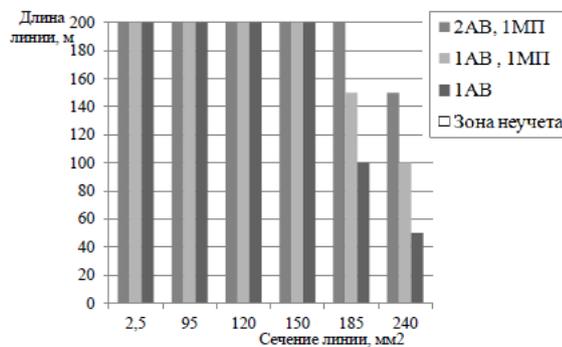


Рис. 6. Зона учета сопротивлений контактной аппаратуры при определении эквивалентного сопротивления схемы с 8 кабелями

Fig. 6 The zone of accounting for the resistances of contact equipment when determining the equivalent resistance of a circuit with 8 cables

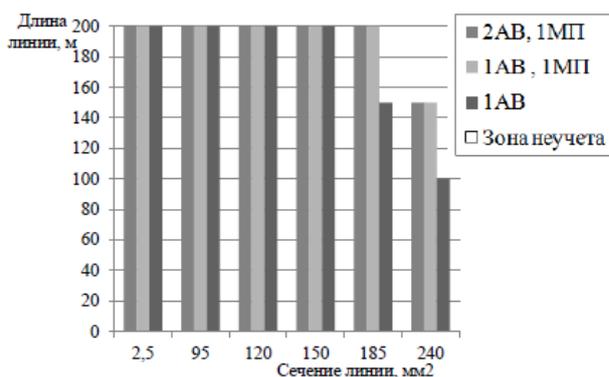


Рис. 7. Зона учета сопротивлений контактной аппаратуры при определении эквивалентного сопротивления схемы с 10 кабелями

Fig. 7 The zone of accounting for the resistances of contact equipment when determining the equivalent resistance of a circuit with 10 cables

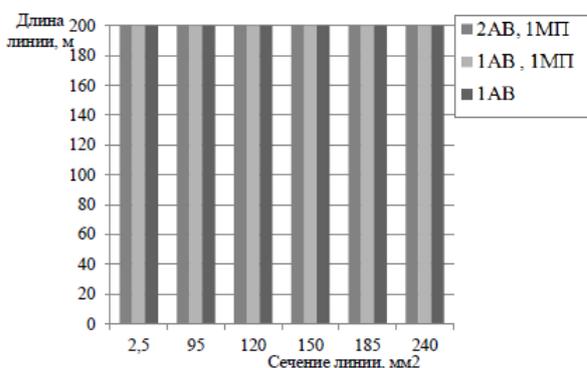


Рис. 8. Зона учета сопротивлений контактной аппаратуры при определении эквивалентного сопротивления схемы с 12 кабелями

Fig. 8 The zone of accounting for the resistances of contact equipment when determining the equivalent resistance of a circuit with 12 cables

В результате вычисления значений эквивалентных сопротивлений по (5) установлено, что для вариантов оборудования схем, не попадающих в зону целесообразности учета сопротивления контактов, расчет приведет к разнице менее 5% по отношению к результату, включающему данный параметр. Приведенные номограммы упрощают представленный алгоритм расчета значений эквивалентных сопротивлений.

Заключение

В статье исследованы вопросы повышения точности оценки значений эквивалентных сопротивлений внутризаводских электрических сетей. Разработан алгоритм метода расчета значений эквивалентных сопротивлений с вычислением эталонной величины. Установлено, что отсутствие учета нагревания проводников (кабелей или проводов) и величины сопротивлений контактной аппаратуры, приводит к погрешности расчетов порядка 45%.

Выявлены закономерности целесообразности учета сопротивлений контактной аппаратуры с выделением зон технических характеристик электрооборудования и построены номограммы при вариации числа и длин кабелей (проводов), их сечений и числа контактной аппаратуры.

Представленные номограммы упрощают вычислительные алгоритмы расчетов.

Повышение достоверности расчетов эквивалентных сопротивлений позволяет уточнять значение уровня потерь ЭЭ во внутризаводских электрических сетях, а, следовательно, эффективно управлять режимами эксплуатации оборудования и изменять топологию схем, что обеспечивает получение рациональных решений в их структурах. Динамика изменения значений эквивалентных сопротивлений низковольтных сетей при сохранении режимных параметров позволяет качественно планировать мероприятия по энергосбережению и улучшать эксплуатационные характеристики систем электроснабжения.

Литература

1. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: «Русайнс», 2017. 168 с.
2. Грачева Е.И., Наумов О.В., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Алгоритмы и вероятностные модели параметров функционирования внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2021. № 1. с.93-104.
3. Грачева Е.И., Шакурова З.М., Абдуллазянов Р.Э. Сравнительный анализ наиболее распространенных детерминированных методов определения потерь электроэнергии в цеховых сетях // Проблемы энергетики. 2019. № 5. С.87-96.
4. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутризаводского электроснабжения // Проблемы энергетики. - 2020. № 2. С.65-74.
5. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Оценка потерь электроэнергии во внутризаводских электрических сетях // Вестник ПИТТУ им. академика М. Осими. 2019. № 4 (13). С. 38-50
6. 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.
7. 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>.
8. 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>.
9. Тошходжаева, М.И. Повышение надежности системы электроснабжения как фактор устойчивого обеспечения народного хозяйства электроэнергией (на примере г. Худжанда РТ) // Вестник ТГУПБП. Серия общественных наук. 2015. № 3(3). С. 71–77.
10. Тошходжаева, М.И. Расчет электрических сетей с распределенной генерации методом двух узлов на примере потребителей промышленных предприятий // Вестник ПИТТУ им. академика М. Осими. 2019. № 3 (12). С. 38-44
11. Сафин А.Р., Хуснутдинов Р.Р., Копылов А.М., и др. Разработка метода топологической оптимизации электрических машин на основе генетического алгоритма // Вестник КГЭУ. 2019. № 4(40). С. 77-85.
12. Petrov T.I., Safin A.R. Modification of the synchronous motor model for topological optimization. (2020) E3S Web of Conferences, 178, paper № 01016.
13. Bo T., Wei, Q., Ze, W. Monitoring IGBT's Health Condition via Junction Temperature Variations. In Proceedings of the 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, Fort Worth, TX, USA. 16-20 March 2014; pp.2550-2555.
14. Cazacu E. Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents // 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). 2017. pp.192-196.
15. Dupont I., Avenas Y. Preliminary evaluation of thermo-sensitive electrical parameters based on the forward voltage for online chip temperature measurements of IGBT devices. IEEE Trans. Ind. Appl. 2015. № 51. pp. 4688-4698.
16. Gheorghita C.M., Adam M. About contact resistance of the electrical equipment. 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca, 2017. pp. 298-301.
17. He X., Guo A. A traction three-phase to single-phase cascade converter substation in an advanced traction power supply system. Energies, 2015. V. 8. № 9. p. 9915-9929.
18. Souza R.T., Costa E.G. Characterization of contacts degradation in circuit breakers through the dynamic contact resistance, Transmission & Distribution Conference and Exposition. Latin America (PES T&D-LA). Medellin, 2014. pp.367-370.
19. Shaodi H., Li X. Early warning of electric equipment current-carrying fault based on equivalent resistance analysis. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016. V. 34. №. 3. pp.541-546.
20. Shin D., Golosnoy I.O., McBride J.W. Advanced Aircraft Power Electronics Systems the impact of simulation, standards and wide band-gap devices. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2018. pp. 1-8
21. Choi U.M., Blaabjerg F., Lannuzzo F. Junction temperature estimation method for a 600 V, 30 A IGBT module during converter operation. Microelectron. Reliab. 2015. № 55. pp. 2022-2026.

Авторы публикации

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – канд. техн. наук, доцент, ректор Казанского государственного энергетического университета.

Грачева Елена Ивановна – д-р техн. наук, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Горлов Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электроснабжение», Юго-Западный государственный университет.

Шакурова Зумейра Мунировна – канд. пед. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Табачникова Татьяна Владимировна - канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Электро- и теплоэнергетики» Альметьевского государственного нефтяного института, г. Альметьевск.

Stanimir Valtchev – New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria.

References

1. Grachieva EI, Naumov OV. *Power losses and efficiency of functioning of equipment of shop networks*. Monograph. Moscow: «Rusains», 201. 168 p.
2. Grachieva EI, Naumov OV, Gorlov AN, et al. Algorithms and probabilistic models of the parameters of the functioning of the intra-factory power supply. *Energy problems*. 2021;1:93-104.
3. Grachieva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining electricity losses in shop networks. *Problems of power engineering*. 2019;5:87-96
4. Grachieva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and evaluation of energy savings in intra-plant power supply systems. *Energy problems*. 2020;2:65-74.
5. Grachieva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Estimation of electric power losses in intra-factory electric networks. *Bulletin of the PITTU named after Academician M. Osimi*. 2019;4 (13):38-50
6. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM. 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.
7. 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>.
8. 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>.
9. Toshkhodzhayeva MI. Improving the reliability of the power supply system as a factor of sustainable provision of the national economy with electricity (on the example of Khujand, RT) / M. I. Toshkhodzhayeva. *Bulletin of the TSUPBP. Social Sciences Series*. 2015;3(3):71-77.
10. Toshkhodzhayeva MI. Calculation of electric networks with distributed generation by the two-node method on the example of consumers of industrial enterprises. *Bulletin of the PITTU named after Academician M. Osimi*. 2019;3(12):38-44
11. Safin AR, Khusnutdinov RR, Kopylov AM, et al. Development of a method for topological optimization of electric machines based on a genetic algorithm. *Bulletin of the KSEU*. 2019;4(40):77-85.12. «Modification of the synchronous motor model for topological optimization» (2020) E3S Web of Conferences. 178. paper № 01016.
13. Bo T, Wei Q, Ze W. *Monitoring IGBT's Health Condition via Junction Temperature Variations*. In Proceedings of the 2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014, Fort Worth, TX, USA. 16-20 March 2014. pp.2550-2555.
14. Cazacu E. *Losses and temperature rise within power transformers subjected to distorted currents*. 15th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). 2017. pp.192-196.
15. Dupont I, Avenas Y. *Preliminary evaluation of thermo-sensitive electrical parameters based on the forward voltage for online chip temperature measurements of IGBT devices*. IEEE Trans. Ind. Appl. 2015;51:4688-4698.

16. Gheorghita CM, Adam M. About contact resistance of the electrical equipment. 2017 International Conference on Modern Power Systems (MPS). Cluj-Napoca. 2017. pp. 298-301.
17. He X, Guo A. A traction three-phase to single-phase cascade converter substation in an advanced traction power supply system. *Energies*, 2015;8(9):9915-9929.
18. Souza RT, Costa EG. *Characterization of contacts degradation in circuit breakers through the dynamic contact resistance, Transmission & Distribution Conference and Exposition. Latin America (PES T&D-LA)*. Medellin. 2014. pp.367-370
19. Shaodi H, Li X. Early warning of electric equipment current-carrying fault based on equivalent resistance analysis. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016;34(3):541-546.
20. Shin D, Golosnoy IO, McBride JW. *Advanced Aircraft Power Electronics Systems the impact of simulation, standards and wide band-gap devices*. *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 2018. pp.1-8
21. Choi UM, Blaabjerg F, Lannuzzo F. *Junction temperature estimation method for a 600 V, 30 a IGBT module during converter operation*. *Microelectron. Reliab.* 2015;55:2022-2026..

Authors of the publication

Edward Yu. Abdullazyanov – Rector of Kazan State Power Engineering University.

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

Alexey N. Gorlov – South-West State University, Kursk.

Zumeyra M. Shakurova – Kazan State Power Engineering University.

Tatyana V. Tabachnikova - Almet'yevsk State Oil Institute.

Stanimir Valtchev – New University of Lisbon, Sofia, Bulgaria.

Получено

19 августа 2021г.

Отредактировано

26 августа 2021г.

Принято

26 августа 2021г.