



ВЛИЯНИЕ НИЗКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ И ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ НА ПОТЕРИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЦЕХОВЫХ СЕТЯХ

Э.Ю. Абдуллазянов¹, Е.И. Грачева¹, А.Н. Горлов², З.М. Шакурова¹,
А.Г. Логачева¹

¹Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

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

erp.kgeu@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Разработать алгоритм оценки потерь электроэнергии с учетом влияющих факторов в магистральных схемах цехового электроснабжения. Провести исследование влияния основных параметров электрооборудования на эквивалентное сопротивление распределительного шинпровода. *МЕТОДЫ.* Используются поэлементные методы расчета потерь активной мощности с помощью эквивалентного сопротивления на примере участка магистральной схемы цеховой сети. Исследовать такие факторы, влияющие на эквивалентное сопротивление шинпровода, как среднеквадратичный коэффициент загрузки, коэффициент формы графика нагрузки, сопротивление контактных соединений коммутационных аппаратов и температура окружающей среды. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Вычислены значения сопротивлений линий ответвлений от шинпровода с учетом нагревания проводников и сопротивлений автоматических выключателей и магнитных пускателей, установленных на линии при поэлементном расчете. Выявлены соотношения в величине эквивалентного сопротивления шинпровода значения сопротивлений контактных соединений низковольтных электрических аппаратов, установленных на линиях ответвлений от шинпровода, значения сопротивлений линий ответвлений с учетом нагревания, значение сопротивления шинпровода и значения сопротивления, обусловленного нагревом шинпровода. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Определена доля каждого из исследуемых параметров в величине эквивалентного сопротивления шинпровода. Вычислено значение относительной погрешности определения эквивалентного сопротивления шинпровода в зависимости от числа присоединенных электроприемников и при учете исследуемых параметров. Проведена оценка величины потерь ЭЭ участка магистральной схемы цеховой сети в соответствии с суточным графиком нагрузки потребителей.

Ключевые слова: *потери электроэнергии; эквивалентное сопротивление сети; электрическая сеть 0,4 кВ; сопротивление контактных соединений низковольтных аппаратов; среднеквадратичный коэффициент загрузки; коэффициент формы графика нагрузки; температура окружающей среды.*

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., Логачева А.Г. Влияние низковольтных электрических аппаратов и параметров электрооборудования на потери электроэнергии в цеховых сетях. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 3. С. 3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-13.

INFLUENCE OF LOW-VOLTAGE ELECTRICAL SWITCHING AND PROTECTING DEVICES AND PARAMETERS OF ELECTRICAL EQUIPMENT ON ELECTRICITY LOSSES IN WORKSHOP POWER SUPPLY NETWORKS

EYu. Abdullazyanov¹, EI. Gracheva¹, AN. Gorlov², ZM. Shakurova¹, AG. Logacheva¹

¹Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

²Southwestern State University, Kursk, Russia

epp.kgeu@mail.ru

Abstract: *THE PURPOSE.* To develop an algorithm for estimating electricity losses, taking into account the influencing factors in the main circuits of shop power supply. To study the influence of the main parameters of electrical equipment on the equivalent resistance of the distribution busbar. *METHODS.* We use element-by-element methods for calculating active power losses using equivalent resistance on the example of a section of the main circuit of the shop network. Factors affecting the equivalent busbar resistance, such as the root-mean-square load factor, the load graph shape factor, the resistance of the contact connections of switching devices, and the ambient temperature, are investigated. *RESULTS.* The values of the resistances of the branch lines from the busbar are calculated taking into account the heating of the conductors and the resistances of the circuit breakers and magnetic starters installed on the line during the element-by-element calculation. The relations in the value of the equivalent resistance of the busbar to the values of the resistances of the contact connections of low-voltage electrical devices installed on the branch lines from the busbar, the values of the resistances of the branch lines taking into account heating, the value of the resistance of the busbar and the values of the resistance due to the heating of the busbar are revealed. *CONCLUSIONS.* The share of each of the studied parameters in the value of the equivalent resistance of the busbar is determined. The value of the relative error in determining the equivalent resistance of the busbar depending on the number of connected electric receivers and taking into account the studied parameters is calculated. The estimation of the value of the electricity losses of the section of the main scheme of the shop network was carried out in accordance with the daily schedule of the load of consumers.

Keywords: *power losses; equivalent network resistance; 0.4 kV electrical network; resistance of contact connections of low-voltage devices; RMS load factor; load graph shape coefficient; ambient temperature.*

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: EYu. Abdullazyanov, EI. Gracheva, AN. Gorlov, ZM. Shakurova, AG. Logacheva. Influence of low-voltage electrical switching and protecting devices and parameters of electrical equipment on electricity losses in workshop power supply networks. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(3):3-13. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-3-3-13.

Введение

В промышленных и электротехнических комплексах значительную долю составляют системы внутрицехового электроснабжения напряжением до 1 кВ. Для топологии таких систем характерным является значительная протяженность и разветвленность низковольтных сетей и существенная величина потерь электроэнергии (ЭЭ) в них [1-5]. С другой стороны, в настоящее время наблюдается устойчивая тенденция увеличения стоимости расходуемой ЭЭ, поэтому возникает необходимость в разработке методик достоверной оценки величины потерь ЭЭ в системах внутрицехового электроснабжения [6-10].

Решение проблемы увеличения точности учета расхода ЭЭ, повышения энергоэффективности электрооборудования промышленных комплексов требует применения современных компьютерных технологий и мониторинга потерь [11-16].

Материалы и методы

Величина потерь ЭЭ в кабеле (проводе) определяется по выражению [3; 17-18]:

$$\Delta W = 3R_{\Sigma} \int_0^T I^2(t) dt \quad (1)$$

где $I(t)$ – величина тока в кабеле (проводе) в момент времени t ; R_{Σ} – величина эквивалентного сопротивления кабеля (провода).

Проанализируем и оценим влияние факторных характеристик схемы и режимов на точность расчета потерь ЭЭ для электрооборудования магистральных схем (рис. 1). В таблице 1 представлены характеристики электрооборудования.

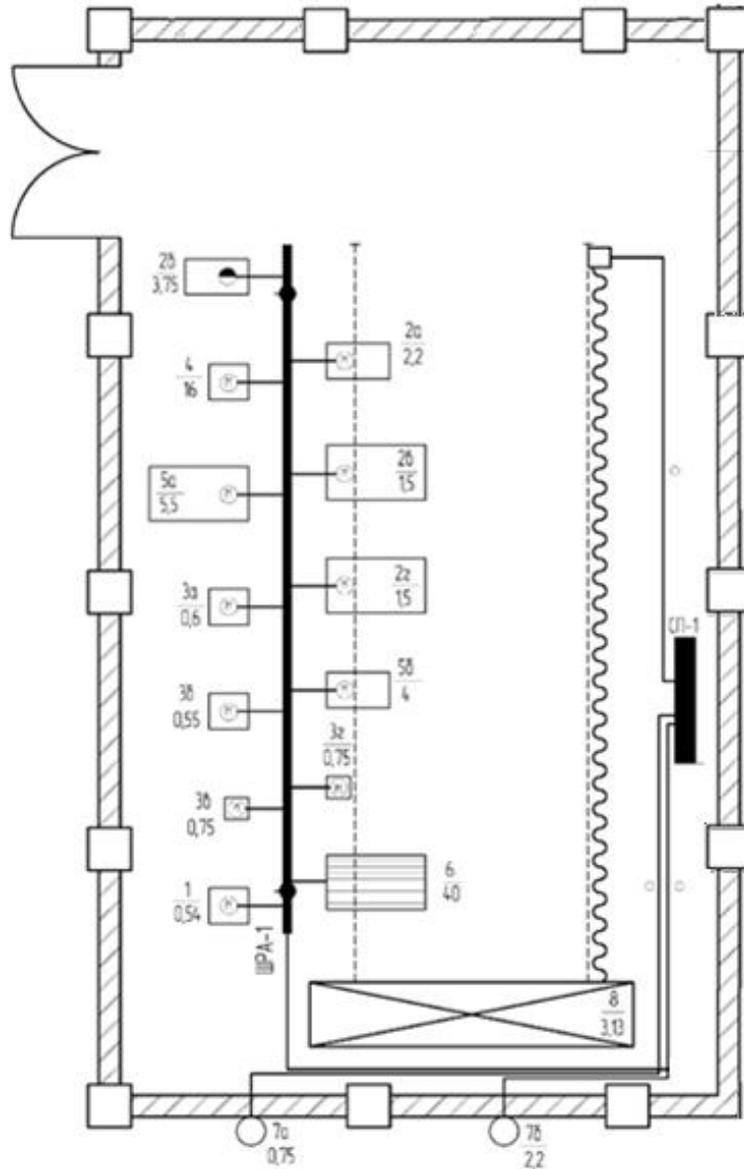


Рис.1. Участок магистральной схемы внутрицеховой сети *Fig. 1. Section of the main circuit of the intra-shop network*

$$R_{\text{эквив}} = \left[r_{0,ш20} l_{ш} \cdot \frac{1}{6} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \left(2 + \frac{1}{n} \right) \right] \cdot \left[1 + \alpha_{ш} (\Theta_{ш} - 20^0) \right] + \frac{r_{20} \cdot l_{\text{отв}}}{n} \left[1 + \alpha_{\text{отв}} (\Theta_{\text{пр}} - 20^0) \right] + \frac{\sum_{i=1}^{\kappa} r_{i,ан}}{n} \quad (2)$$

где, $r_{0,ш20}$ – значение сопротивления одного метра шинпровода при 20^0 С., $l_{ш}$ – длина шинпровода, м;

n – число присоединенных к шинпроводу потребителей;

r_{20} - значение удельного сопротивления одного метра ответвительного кабеля при 20С, мОм/м

$\theta_{ш}$ - температура шинпровода, °С,

$l_{отв}$ - длина кабеля ответвления от шинпровода, м;

$\alpha_{отв}$ - значение температурного коэффициента роста сопротивления материала проводника линии, для меди равно 0,00428 1/°С;

$\alpha_{ш}$ - значение температурного коэффициента роста сопротивления материала проводника линии, для алюминия равно 0,0038 1/°С;

$\theta_{пр}$ - значение температуры жилы проводника, зависящее от токовой нагрузки линии и от температуры окружающей среды, °С;

$\sum_{i=1}^k r_{i,ан}$ - общая сумма сопротивлений контактов и контактных соединений

низковольтных электрических аппаратов, установленных на линии, мОм.

Величины сопротивлений контактов электрических аппаратов низкого напряжения приведены в таблице 2 [3].

Питание электроприемников, подключенных к шинпроводу производится по кабелям марки ВВГнг-Is. В таблице 3 даны параметры линий участка схемы внутрицеховой сети.

Таблица 1

Характеристика электрооборудования

Наименование электроприемников	№ линии	Номинальная мощность P_n , кВт	Длина линии, м	Расчетный ток в линии I_p , А	Допустимый длительный ток $I_{доп}$, А	Сечение провода, мм ²	Удельное сопротивление кабеля r_0 , мОм/м	Количество автоматов и контактов	Количество магнитных пускателей	Коэффициент загрузки линии, к.
1. Настольный сверлильный станок <i>Aiztronic 9</i>	Л11	0,54	2,7	2,9	19	1,5	12,3	1	1	0,15
2в. Универсально-фрезерный станок <i>MF4 Vario DPA</i>	Л12	3,75	2,7	13,4	19	1,5	12,3	1	1	0,71
2г. Универсально-фрезерный станок <i>Proma FHV-50P</i>	Л11	1,5	2,7	6,0	19	1,5	12,3	1	1	0,32
3а. Токарный станок <i>Opti D 180x300 Vario</i>	Л4	0,6	2,7	2,6	19	1,5	12,3	1	1	0,14
3б. Токарный станок <i>BD-920W Jet</i>	Л3	0,55	2,7	2,3	19	1,5	12,3	1	1	0,12
3в. Токарный станок <i>Quantum D210x400</i>	Л2	0,75	2,7	3,2	19	1,5	12,3	1	1	0,17
3г. Токарный станок <i>Quantum D210x400</i>	Л9	0,75	2,7	3,2	19	1,5	12,3	1	1	0,17
5а. Универсально-фрезерный станок <i>MF2 Vario DPA</i>	Л5	4	2,7	8,2	19	1,5	12,3	1	1	0,43
5б. Универсально-фрезерный станок <i>MF4 Vario DPA</i>	Л10	5,5	2,7	11,2	19	1,5	12,3	1	1	0,59
6. Токарный станок <i>BD-920W Jet</i>	Л8	0,55	2,7	2,4	19	1,5	12,3	1	1	0,12
2а. Универсально-фрезерный станок <i>MF1 Vario</i>	Л13	6,5	2,7	19,8	26	2,5	7,4	1	1	0,76
2б. Универсально-фрезерный станок <i>MF2 Vario DPA</i>	Л7	4	2,7	8,7	19	1,5	12,3	1	1	0,46
4. Универсально-фрезерный <i>MF1 Vario</i>	Л6	5	2,7	26,8	34	4	4,63	1	1	0,79
<i>Canalis KNA-04 63 A</i>	ШР	27,64	15	42	63	-	1,9	-	-	0,67

Для магистральных схем, представленных распределительными шинопроводами, величина эквивалентного сопротивления шинопровода вычисляется [3]:

Таблица 2

Эмпирические зависимости величины сопротивлений контактов электрических аппаратов низкого напряжения в функции номинальных токов

Тип электрического аппарата низкого напряжения	Значение номинального тока, I_n , А	Эмпирическая зависимость сопротивления контактов аппарата в функции значения номинального тока
Магнитные пускатели	<75	$R=830/I_n$
	≥ 75	$R=760/I_n$
Автоматы и контакторы	<65	$R=349/I_n$
	≥ 65	$R=307/I_n$

Определим для схемы рис. 1 величину эквивалентного сопротивления шинопровода в соответствии с поэлементным расчетом

$$R_{\text{экв.ш. по элем}} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_i}{3I_{p,ш}^2} \quad (3)$$

В результате вычислений получено $R_{\text{экв.ш. по элем}} = 55,8$ мОм, где ΔP_i - величина активных потерь мощности для схемы с учетом нагрева проводников и сопротивлений контактов, Вт;

$I_{p,ш}$ - значение расчетного тока шинопровода, А

Вычисленные значения сопротивлений контактных соединений шинопровода без учета и с учетом нагревания проводника и секций шинопровода, а также значения сопротивлений контактов аппаратов представлены в табл 3.

Таблица 3

Значения сопротивлений линий с учетом влияющих факторов при поэлементном расчете

Номер линии на схеме	Сопротивление линии без учета нагрева проводника, мОм	Сопротивление линии с учетом нагрева проводника, мОм	Сопротивление контактов автоматических выключателей, мОм	Сопротивление контактов магнитных пускателей, мОм	Общее суммарное сопротивление участка сети, мОм
Л1	33,2	33,4	116,3	82,5	232,2
Л12	33,2	36,8	21,8	51,6	110,2
Л11	33,2	33,9	34,9	82,5	151,3
Л4	33,2	33,3	116,3	82,5	232,1
Л3	33,2	33,3	116,3	82,5	232,1
Л2	33,2	33,4	87,3	82,5	203,2
Л9	33,2	33,4	87,3	82,5	203,2
Л5	33,2	34,6	34,9	82,5	152,0
Л10	33,2	35,7	21,8	51,6	109,1
Л8	33,2	33,3	116,3	82,5	232,1
Л13	20	22,5	15,4	33,0	70,9
Л7	33,2	34,7	34,9	82,5	152,1
Л6	12,5	14,2	10,9	25,8	50,9
ШР	10,6	12,0	-	-	12,0

Результаты и обсуждение

На рис. 2 показаны гистограммы соотношений в величине эквивалентного сопротивления шинопровода значений сопротивлений контактов аппаратов, значений сопротивлений секций шинопровода и линий ответвлений, с учетом их нагревания.

В табл. 4 приведены данные вычислений значений эквивалентного сопротивления схемы и погрешности определения величины эквивалентных сопротивлений по отношению

к значению сопротивления, вычисленного с помощью поэлементного расчета при различном числе присоединенных потребителей.

Результаты расчетов эквивалентного сопротивления схемы и учета влияния таких параметров электрооборудования как нагрев проводников и сопротивления контактов аппаратов показаны в таблице 5 и на рис.3.

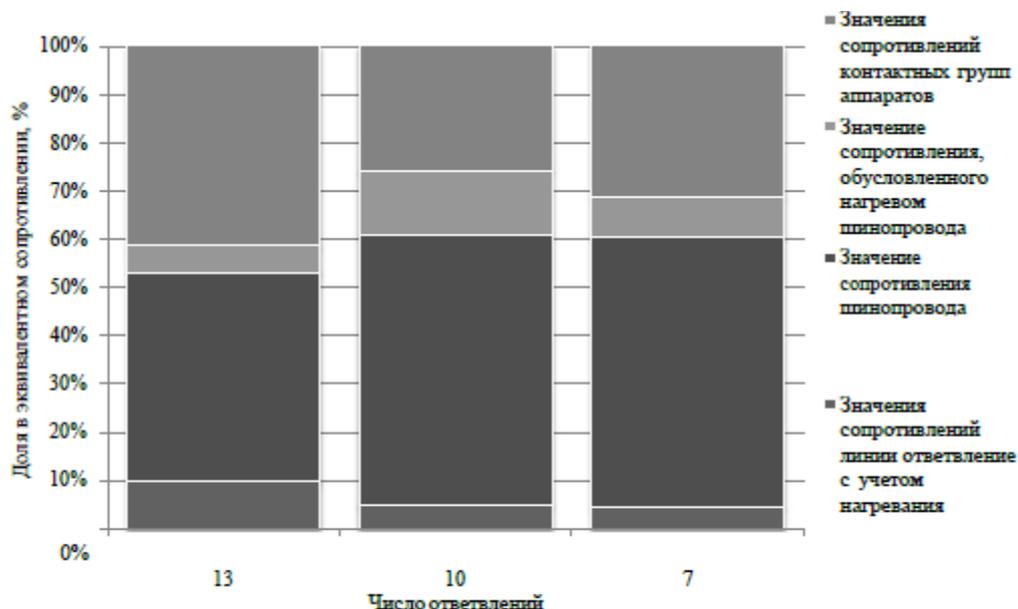


Рис. 2 Соотношение в величине эквивалентного сопротивления шинпровода сопротивлений контактных групп аппаратов, секций шинпровода и линий ответвлений с учетом нагревания проводников и числа ответвлений от шинпровода

Fig. 2 The ratio in the value of the equivalent resistance of the busbar of the resistances of the contact groups of devices, sections of the busbar and branch lines, taking into account the heating of the conductors and the number of branches from the busbar

Таблица 4

Значения эквивалентного сопротивления схемы и результирующая погрешность вычислений

Число присоединенных потребителей	$R_{\text{экв ш. поэлемент}}$ мОм	$R_{\text{эквив}}$ мОм	Значение погрешности вычислений, %
13	290,7	284,1	-2,9
10	269,3	280,6	4,5
5	298,1	255,0	-14,5

Таблица 5

Оценка значений эквивалентного сопротивления шинпровода и их отклонения от эталонного значения эквивалентного сопротивления

Количество приемников электроэнергии	Без учета нагрева без учета сопротивления контактных соединений аппаратов, мОм	С учетом нагрева без учета сопротивления контактных соединений аппаратов, мОм	С учетом нагрева и сопротивления контактных соединений аппаратов, мОм	Без учета нагрева с учетом сопротивления контактных соединений аппаратов, мОм
13	12,98	14,43	24,60	23,15
10	30,41	36,34	48,96	43,03
5	33,13	35,70	51,84	49,27
Относительная погрешность, %				
13	-47	-41	0	-6
10	-38	-26	0	-12
5	-36	-31	0	-5

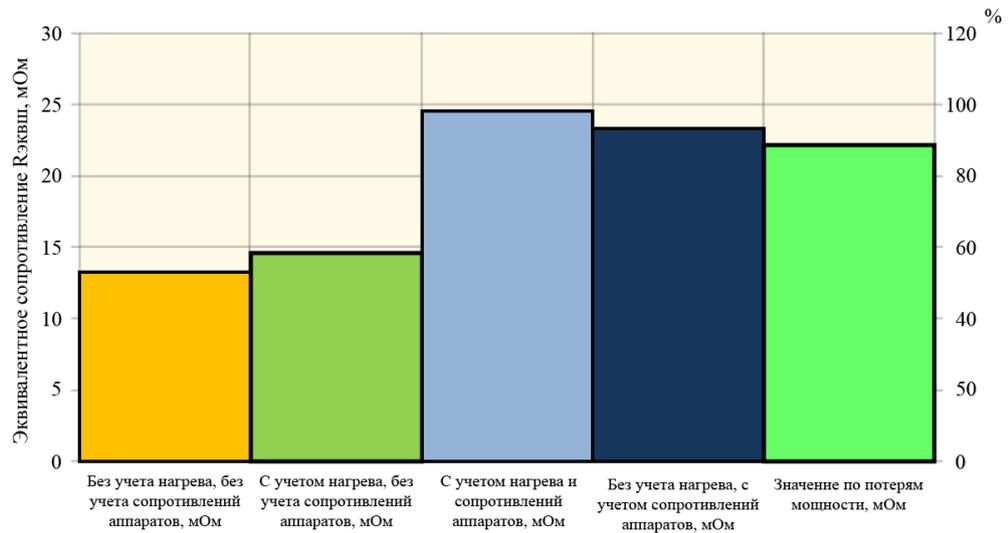


Рис. 3 Учет основных факторов, влияющих на величину эквивалентного сопротивления шинпровода *Fig. 3 Accounting for the main factors affecting the value of the equivalent resistance of the busbar*

Рисунок 4 графически иллюстрирует оценку влияния основных параметров оборудования на эквивалентное сопротивление шинпровода:

- процессы нагрева проводников нагрузочным током;
- величины сопротивлений контактов электрических аппаратов низкого напряжения;
- значения среднеквадратичного коэффициента загрузки линий K_3 .

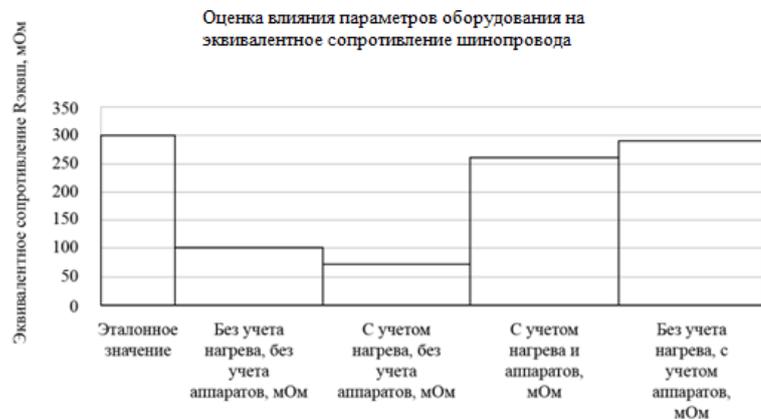


Рис 4. Оценка влияния параметров оборудования на величину эквивалентного сопротивления шинпровода *Fig. 4. Evaluation of the influence of equipment parameters on the value of the equivalent resistance of the busbar*

Проведем оценку влияния вида графиков нагрузок на точность расчета потерь ЭЭ. Одним из коэффициентов, характеризующих графики нагрузок, является коэффициент формы K_ϕ , определяемый отношением среднеквадратичной мощности $P_{ск}$ электроприемника или группы электроприемников за определенный период времени к среднему значению (P_{cp}) его мощности за тот же период времени:

$$K_\phi = \frac{P_{ск}}{P_{cp}} \quad (4)$$

где среднее значение мощности приёмника или группы приёмников,

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n} \quad (5)$$

а среднеквадратичная мощность приёмника или группы приёмников за определенный период времени

$$P_{ск} = \sqrt{\frac{P_1^2 \Delta t_1 + P_2^2 \Delta t_2 + P_n^2 \Delta t_n}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i}} \quad (6)$$

где Δt_i - интервал времени на графике нагрузки,

n - число интервалов.

Вычислим потери электроэнергии участка магистральной схемы:

$$\Delta W = 3 \cdot \kappa_{\phi}^2 \cdot I_{cp}^2 \cdot R_{экви} \cdot T \quad (7)$$

где $R_{экви}$ - значение эквивалентного сопротивления шинпровода;

T - значение расчетного интервала времени;

I_{cp} - средний ток шинпровода;

$\kappa_{\phi} = 1,03$ - значение коэффициента формы, вычисленного в соответствии с графиком рис.4.

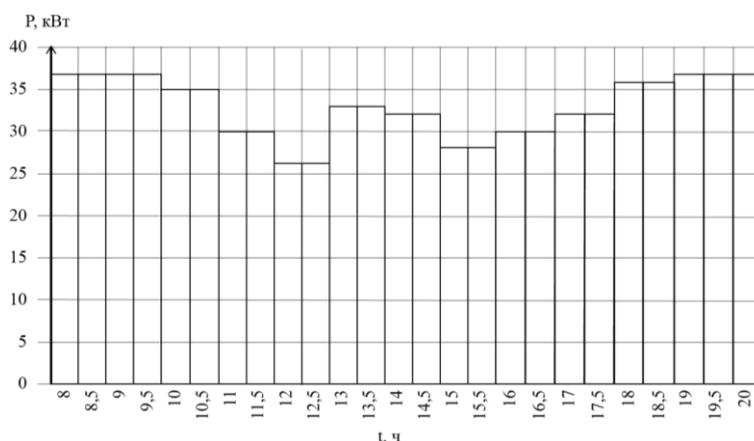


Рис. 5 Вид суммарного графика нагрузок потребителей, присоединенных к шинпроводу *Fig. 5 View of the total load graph of consumers connected to the busbar*

В соответствии с графиком рис. 5 величина потерь ЭЭ составят для шинпровода по выражению (7) для расчетного времени $T=24$ ч с учетом κ_{ϕ} $\Delta W = 2054$ Вт ч, без учета κ_{ϕ} $\Delta W = 2512$ Вт ч. Погрешность вычислений при этом составляет 5,6%.

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что для повышения достоверности оценки уровня потерь ЭЭ в магистральных схемах цеховых сетей требуется учет таких параметров электрооборудования, как нагревание проводников вследствие протекающего тока и температуры помещений; сопротивлений контактных групп электрических аппаратов, установленных на линиях сети, а также вида графиков нагрузок потребителей. Необходимость учета вышеперечисленных параметров целесообразна для сетей низкого напряжения любой топологии, что подтверждается многочисленными проведенными исследованиями [1-3, 10,12].

Литература

1. 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.
2. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Шакурова З.М. Анализ и оценка экономии электроэнергии в системах внутривозовского электроснабжения // Проблемы энергетики. 2020. № 2. С. 65-74.
3. Грачева Е.И., Наумов О.В. Потери электроэнергии и эффективность функционирования оборудования цеховых сетей. Монография. М.: РУСАЙНС, 2017. 168 с.
4. Вохидов А.Д., Дадабаев Ш.Т., Разаков Ф.М. К вопросу о задачах повышения надежности системы электроснабжения насосной станции первого подъема. Надежность. 2016. Т. 16. № 4 (59). С. 36-39.

5. Дадабаев Ш.Т. Разработка математической модели системы регулирования насосных агрегатов оросительной станции первого подъема. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 9-1. С. 532-536.
6. Petrov T.I., Safin A.R. «Modification of the synchronous motor model for topological optimization» (2020) E3S Web of Conferences, 178, paper № 01016.
7. 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. V. 27, Iss. 3. P. 1982-1997.
8. 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. pp. 979–984.
9. Busom N. et al. Efficient smart metering based on homomorphic encryption // Computer Communications. 2016. V. 82. pp.95-101.
10. Конюхова Е.А. Проектирование систем электроснабжения промышленных предприятий (теория и примеры). Издательство «Кнорус», 2016.
11. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Y., Safin A.R., et al. An Experimental Bench for the Study of Electric Drives of a Horsehead Pump // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems (JARDCS) ISSN: 1943-023X, V.12, 05-SPECIAL ISSUE. 2020. pp. 1294-1298.
12. Конюхова Е.А. Экономико-математическая модель рабочей части системы электроснабжения объекта на среднем и низком напряжении. Электричество. 2018. № 9.
13. William H. Kersting Distribution System Modeling and Analysis. - Second Edition. CRC Press, 2007.
14. 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.
15. Lasso H., Ascanio C., Guglia M.A model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network // IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2006. p.1-6.
16. Safin A., Kopylov A., Gibadullin R., et al. Thermal Model of a Linear Electric Machine. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia, 2019, pp. 426-428.
17. Тошходжаева М.И., Ходжиев А.А. Перспективы применения композиционных проводов в условиях резко континентального климата // Международный технико-экономический журнал. 2018. № 1. С. 91–97.
18. Тошходжаева М.И. Применение высокотемпературных композиционных проводов в условиях резко континентального климата // Вестник ПИТТУ имени академика М. Осими. Научно-технический журнал. 2017. № 1(2). С. 30–35.

Авторы публикации

Абдуллазянов Эдвард Юнусович – канд. техн. наук, 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, г. Курск.

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

Логачева Алла Григорьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Gracheva EI, Shakurova ZM, Abdullazyanov RE. Comparative analysis of the most common deterministic methods for determining energy losses in workshop networks. *Problems of Energy*. 2019;5:87-96.
2. Gracheva EI, Gorlov AN, Shakurova ZM. Analysis and evaluation of energy savings in the systems of in-plant power supply. *Energy problems*. 2020;2:65-74.
3. Gracheva EI, Naumov OV. *Loss of electricity and the effectiveness of the operation of equipment workshop networks*. Monograph. M.: RUSAINS, 2017. 168 p.
4. Vokhidov AD, Dadabaev ShT, Razokov FM. On the problems of improving the reliability of the power supply system of the first lift pumping station. *Reliability*. 2016;16;4 (59):36-39.
5. Dadabaev ShT. *Development of a mathematical model of the control system of pumping units of the irrigation station of the first lift*. Proceedings of the Tula State University. Technical sciences. 2017;9-1:532-536.
6. Petrov TI, Safin AR. *Modification of the synchronous motor model for topological optimization*. (2020) E3S Web of Conferences, 178, paper № 01016.
7. 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;27(3):1982–1997. doi: <https://doi.org/10.3906/elk-1805-84>.
8. Lei C, Tian W, Zhang Y, Fu Ret, 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>.
9. Busom N, et al. Efficient metering based on homomorphic encryption. *Computer Communications*. 2016;82:95-101.
10. Konyukhova EA. *Design of power supply systems for industrial enterprises (theory and examples)*. Knorus Publishing House, 2016.
11. Tsvetkov AN, Kornilov VY, Safin AR, et al. An Experimental Bench for the Study of Electric Drives of a Horsehead Pump. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems (JARDCS)* 05-special issue. 2020;V.12:1294-1298. doi: [10.5373/JARDCS/V12SP5/20201888](https://doi.org/10.5373/JARDCS/V12SP5/20201888).
12. Konyukhova EA. Economic-mathematical model of the working part of the power supply system of an object at medium and low voltage. *Electricity*. 2018, No. 9.
13. William H. *Kersting Distribution System Modeling and Analysis. Second Edition*. CRC Press, 2007.
14. 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.
15. Lasso H, Ascanio C, Guglia M. *A model for calculating technical losses in the secondary energy distribution network*. IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America. 2006. p.1-6.
16. Safin A, Kopylov A, Gibadullin R, et al. *Thermal Model of a Linear Electric Machine*. 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA), Lipetsk, Russia. 2019. pp. 426-428.
17. Tashkhodjaev MI, Hodjiev AA. Prospects for the use of composite wires in the conditions of sharply continental climate. *International techno-economic journal*. 2018;1:91-97.
18. Tashkhodjaev MI. Application of high temperature composite wires in the conditions of sharply continental climate // *Bulletin of the PITTU named after Academician M. Oshimi. Scientific and technical journal*. 2017;1(2):30-35.

Authors of the publication

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

Elena I. Gracheva – Kazan State Power Engineering University.

© Э.Ю. Абдуллазянов, Е.И. Грачева, А.Н. Горлов, З.М. Шакурова, А.Г. Логачева

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

Zumeyra M. Shakurova –Kazan State Power Engineering University.

Alla G. Logacheva –Kazan State Power Engineering University.

Получено

08.04.2021 г.

Отредактировано

14.04.2021 г.

Принято

29.04.2021 г.