

Г. Ю. КИСЕЛЁВ
В. М. ТРОЦЕНКО
Е. В. ПЕТРОВА
В. А. КРИВОЛАПОВ
С. С. ГИРШИН
А. А. БУБЕНЧИКОВ
В. Н. ГОРЮНОВ

Омский государственный
технический университет,
г. Омск

ПОТЕРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

В данной статье рассмотрена актуальность снижения потерь электрической энергии. Приведены фактические значения и планы снижения потерь электрической энергии в ПАО «Россети» и основных филиалах ПАО «Россети Сибирь». Представлены существующие нормативы потерь в электрических сетях разных уровней напряжения. Рассмотрены возможные пути уменьшения потерь электроэнергии для достижения целевых показателей, установленных «Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года».

Ключевые слова: потребление электроэнергии, потери электроэнергии, стратегия развития, нормативы потерь, программа развития, снижение потерь.

Стремительный рост численности населения, а также быстрые темпы развития различных отраслей промышленности, прямо или косвенно связанных с потреблением электрической энергии, приводят к увеличению потребления электроэнергии.

В соответствии с данными, предоставленными компанией Enerdata мировое потребление электроэнергии с 1990 по 2020 год увеличилось в 2,29 раза [1]. На сегодняшний день компания Enerdata является одной из крупнейших независимых информационно-консалтинговых компаний, основной спецификой работы которой является проведение глобальных исследований энергопотребления в мире.

В соответствии с разбивкой по странам внутреннего потребления электроэнергии за 1990 год [1], самыми крупными потребителями электроэнергии в порядке уменьшения являлись Соединенные Штаты Америки — 2713 ТВтч, Россия — 917 ТВтч, Япония — 775 ТВтч [1].

По состоянию на 2020 год Россия переместилась на четвертое место по потреблению электроэнергии с показателем — 906 ТВтч, Соединенные Штаты Америки переместились на второе место с показателем — 3842 ТВтч, и на первое место со значительным отрывом от других стран вырвался Китай с показателем — 6752 ТВтч. Это связано с тем, что на сегодняшний день Китай является абсолютным лидером по объемам промышленного производства. Большое количество иностранных промышленных комплексов располагается именно на территории Китая [1].

Потребление электроэнергии в России в 2020 году незначительно снизилось в сравнении с 1990 годом. Однако данная тенденция не имеет прямолинейного характера, и в период 90-х годов наблюда-

ется значительное снижение потребления (рис. 1). Так, на 1998 год верхняя отметка электропотребления составляла всего 650 ТВтч. В дальнейшем прослеживается плавный рост электропотребления вплоть до 2019 года с небольшой просадкой в 2009 году [1]. Однако в 2020 году потребление электроэнергии в России сократилось, что напрямую связано с пандемией COVID-19.

Проанализировав тенденцию изменения потребления электроэнергии в мире за период с 1990 по 2020 года (рис. 2), можно отметить, что в 2020 году мировое потребление электроэнергии сократилось на 1,1 % в сравнении с 2019 годом. Это первое снижение с 2009 года, контрастирующее с устойчивым ростом в период с 2009 по 2018 год, который замедлился в 2019 году. В подавляющем большинстве стран пандемия COVID-19 оказала значительное влияние на спрос электроэнергии, в том числе и в Российской Федерации. Интересно отметить, что Китай быстро реабилитировался от кризиса, вызванного пандемией COVID-19. В 2020 году увеличение объема потребляемой электроэнергии в Китае составило 3,1 % [1].

Ввиду колоссального роста потребления электроэнергии требуется незамедлительное увеличение пропускной способности линий электропередач и снижение потерь электроэнергии.

Существующие на сегодняшний день способы экономии электроэнергии не могут в полной мере обеспечить достижения максимально возможных энергетических показателей. Таким образом, необходимо разработать новые способы и подходы к проблеме снижения потерь электроэнергии.

Основные задачи и пути развития энергетики Российской Федерации определены рядом нор-

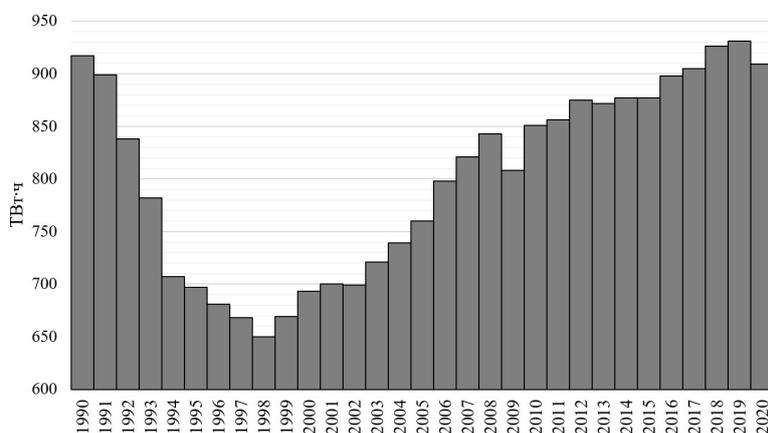


Рис. 1. Тенденция изменения потребления электроэнергии в год за период 1990–2020 в России

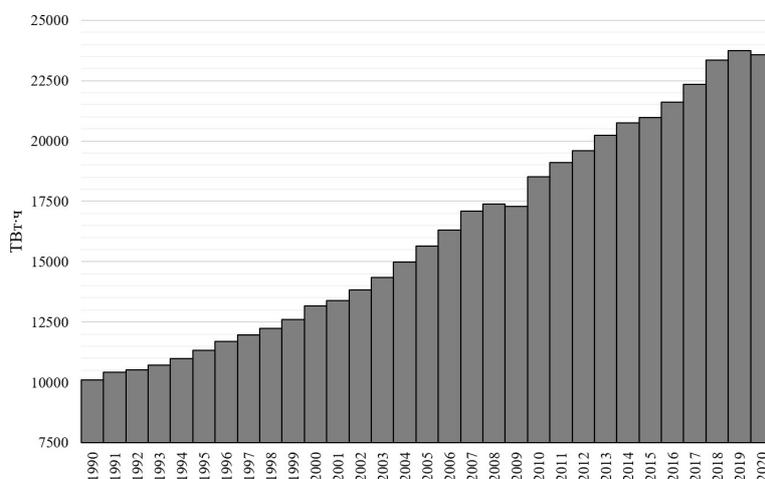


Рис. 2. Тенденция изменения потребления электроэнергии в год за период 1990–2020 в мире

мативных документов Правительства Российской Федерации. Распоряжением Правительства РФ от 9 июня 2020 г. № 1523-р «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года» критерием повышения эффективности энергетического комплекса определен уровень потерь электрической энергии в электрических сетях [2]. Согласно намеченной стратегии, к 2024 году уровень потерь электрической энергии в электрических сетях не должен превышать 9,8 %, а к 2035 году потери не должны превышать 7,3 % [2]. Распоряжением Правительства РФ от 03 апреля 2013 № 511-р (ред. от 29 ноября 2017 г.) «Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации» в главе 3 «Организация максимально эффективной и соответствующей мировым стандартам сетевой инфраструктуры» установлено, что «Повышение операционной эффективности неразрывно связано с реализацией мероприятий, направленных на снижение потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям» [3]. Постановлением Правительства РФ от 15 апреля 2014 г. № 321 (ред. от 12 декабря 2022 г.) утверждена государственная программа Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики» [4]. Программой определены цели государственной политики в области энергетики. При этом одной из проблем названы: «высокие потери в электрических сетях, неоптимальная нагрузка генерирующих

мощностей в Единой энергетической системе России», что так же подтверждает необходимость поиска решения отмеченной выше проблемы [4]. Более детальное развитие стратегия получила в Программе инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 годы с перспективой до 2025 года». В главе 2.2 данного документа определено, что одним из направлений является «развитие, модернизация и повышение энергоэффективности ЕНЭС путем снижения потерь в электрической сети [5].

Снижение указанного показателя является важным для развития экономики России. По минимальным экспертным оценкам, потенциал снижения потерь электроэнергии в сетях России находится в пределах 15–25 млрд. кВт·ч в год. [6]. Для стран с устойчивой экономикой международные специалисты считают приемлемыми потери в электросетях в диапазоне от 4 до 5 %. При этом предельный уровень потерь с учетом всех факторов и особенностей транспортировки обозначен в 10 % [7]. При более высоких значениях потерь в сети высока вероятность присутствия также и коммерческих потерь.

В основе представленной ниже информации лежат официальные отчетные сведения о фактических потерях в ПАО «Россети» и в филиалах ПАО «Россети Сибирь», размещенные в открытом доступе. Наибольший потенциал для сокращения потерь заложен в сетях распределительного комплекса. В сети классов напряжения («Россети Сибирь») 0,4–

Нормативы потерь электроэнергии

Отпуск электрической энергии в электрическую сеть/ суммарная протяженность воздушных и кабельных линий электропередачи в одноцепном выражении	Соотношение величины отпуска электрической энергии в электрическую сеть и суммы номинальных мощностей силовых трансформаторов	Доля протяженности воздушных линий электропередачи в одноцепном выражении в суммарной протяженности воздушных и кабельных линий электропередачи в одноцепном выражении	Значение норматива потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций
Высокое напряжение (110 кВ)			
3500 и менее	2 000 и менее	–	5,02
	более 2 000		4,75
более 3500	2 000 и менее		3,33
	более 2 000		2,30
Среднее первое напряжение (35 кВ)			
700 и менее	2 000 и менее	–	5,77
	более 2 000		4,96
более 700	2 000 и менее		5,45
	более 2 000		4,07
Среднее второе напряжение (1–20 кВ)			
–	2 000 и менее	более 30	8,49
	более 2 000		7,36
	2 000 и менее	30 и менее	6,17
	более 2 000		6,08
Низкое напряжение (0,4 кВ и ниже)			
– 30 и менее		более 30	13,49
		10,49	

Таблица 2

Фактические потери электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь»

ПАО «Россети Сибирь»	Уровень потерь электроэнергии, %					
	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Алтайэнерго	7,68	7,55	7,17	7,07	6,61	6,52
Бурятэнерго	7,79	7,01	6,74	7,14	11,99	11,37
ГАЭС	16,43	16,84	15,62	15,23	15,11	14,44
Красноярскэнерго	11,3	13,29	11,59	11,18	10,71	9,99
Кузбассэнерго-РЭС	4,14	4,42	4,29	3,97	3,62	3,54
Омскэнерго	7,21	7,25	7,51	6,85	6,99	6,65
Хакасэнерго	2,16	2,14	3,2	7,1	6,78	7,22
Читаэнерго	11,09	10,46	9,85	9,38	8,87	8,78
Итого по ПАО «Россети Сибирь»	6,96	7,36	7,32	7,5	7,55	7,28

Таблица 3

План снижения потерь электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь» в перспективе до 2030 года

ПАО «Россети Сибирь»	Уровень потерь электроэнергии, %					
	2020	2021	2022	2023	2024	2030
Итого по ПАО «Россети Сибирь»	7,28	7,50	7,43	7,34	7,17	5,83

10 (20) кВ потери составляют в среднем 15 % [8, 9], что значительно выше технической составляющей.

В табл. 1 представлены рекомендуемые нормативы потерь электроэнергии, вступившие в силу

в апреле 2018 года [10]. Различные значения нормативов при одном напряжении определяются протяженностью линии электропередачи, величиной отпуска электроэнергии, а также значениями номи-

Уровень потерь электрической энергии по ДЗО в ПАО «Россети»

Наименование ДЗО	Уровень потерь электрической энергии, %							
	2015	2016	2017	2018	2019	2020 план	2020 факт	2021 план
Россети Центр	9,35	9,36	9,86	10,6	10,26	9,83	9,83	9,43
Россети Центр и Приволжье	9,07	8,97	7,98	7,84	7,49	7,24	7,93	7,31
Россети Волга	6,7	6,77	6,6	6,48	6,33	6,13	6,12	6,14
Россети Северо-Запад	6,38	6,22	6,07	6,59	6,32	6,22	6,22	5,11
Россети Томск	8,28	8,14	8,27	9,00	8,88	8,66	9,09	10,14
Россети Урал	7,89	7,98	7,73	7,42	7,11	7,03	6,95	6,71
Россети Юг	9,83	10,06	9,48	9,80	9,01	8,85	8,85	8,99
Россети Северный Кавказ	21,84	23,08	21,78	19,98	18,9	17,92	23,23	18,26
АО «Чеченэнерго»	40,32	34,00	34,49	35,87	36,8	28,17	34,09	26,00
Россети Кубань	12,87	12,96	12,06	11,25	10,62	10,51	10,04	10,50
Россети Московский регион	8,55	8,33	8,24	8,10	7,67	7,68	7,53	7,53
Россети Ленэнерго	12,21	10,91	11,47	11,34	10,82	10,88	10,87	10,50
Россети Сибирь	7,26	7,68	7,63	7,81	7,82	7,76	7,53	7,69
Россети Тюмень	2,54	2,54	2,61	2,84	2,66	2,6	2,67	2,49
Россети Янтарь	18,44	16,99	15,47	12,57	11,46	12,19	10,12	8,71
Итого по ПАО «Россети»	9,64	9,65	9,22	8,95	8,57	8,58	8,64	8,60

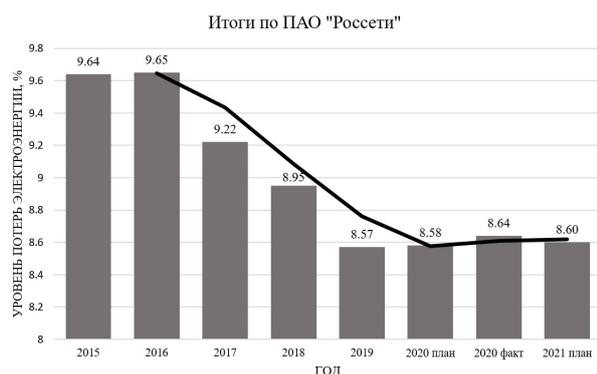


Рис. 3. Уровень потерь электрической энергии в ПАО «Россети» с 2015 по 2021 год

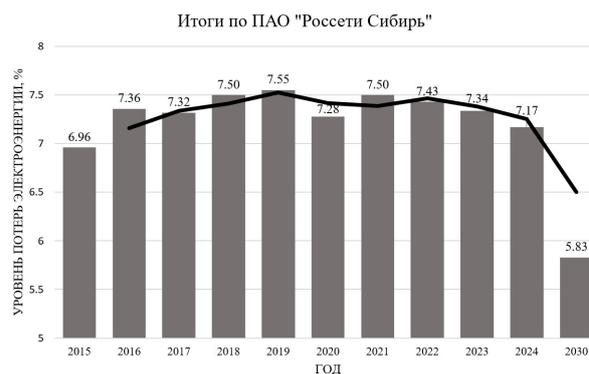


Рис. 4. Уровень потерь электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь» с 2015 по 2030 год

нальных значений параметров силовых трансформаторов.

В соответствии с годовыми отчетами ПАО «Россети Сибирь» [11] в табл. 2 представлен уровень фактических потерь электроэнергии за последние 6 лет в основных филиалах, а в табл. 3 представлен план снижения потерь электрической энергии в ПАО «Россети Сибирь» в перспективе до 2030 года, утвержденный программой инновационного развития [12].

В соответствии с годовыми отчетами ПАО «Россети» [13] в табл. 4 представлен уровень фактических потерь электроэнергии за последние 6 лет во всех дочерних и зависимых обществах, а также представлен план на 2021 год. По итогам уровень потерь электроэнергии в 2020 году составил 8,64 %, что выше уровня 2019 года [13].

Результирующие потери электроэнергии по всем ДЗО ПАО «Россети» и основным филиалам ПАО «Россети Сибирь» представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Анализ таблиц показывает аномально высокие потери электроэнергии в ДЗО

«Россети Северный Кавказ», АО «Чеченэнерго», в филиале «ГАЭС» и в незначительной мере в ряде других компаний.

Выводы и заключение. Из таблиц и диаграмм видно, что необходимо вводить мероприятия по снижению потерь электроэнергии. Особенно актуальным является проведение мероприятий технического и организационного характера, направленных на снижение технологических и коммерческих потерь в целом по ПАО «Россети», а также по отдельным сетевым компаниям, в которых потери аномально высоки. В 2020 году потери составили 8,64 % [13], а план по потерям в 2020 году составлял — 8,56 %. Чрезвычайно важна работа по уменьшению потерь в сетях низкого напряжения.

Существует как минимум два пути решения данной проблемы. Первый предложен ПАО «Россети Сибирь» и представляет собой следующую проводимую работу:

1) установка интеллектуальных приборов коммерческого учета электрической энергии, пресечение безучетного потребления энергии, снижение

затрат на собственные нужды, а также изменение конфигурации сети и реконструкция;

2) дальнейшая положительная динамика по снижению потерь будет осуществляться на основе внедрения информационной системы комплексного учета электроэнергии в рамках Программы «Цифровая трансформация сетей 2030» [14];

3) реализация мероприятий Программы по снижению потерь в сетевом комплексе ПАО «Россети» (утверждена в 2017) определяла выход на уровень зарубежных компаний в 2021 году [9].

Второй путь уменьшения потерь связан с повышением точности расчета потерь электроэнергии за счет учета тепловых процессов [15–20].

На кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» в Омском государственном техническом университете на базе проведенных исследований созданы программные продукты, обеспечивающие расчет потерь электрической энергии, допустимых токов, а также температуры изолированных, неизолированных и высокотемпературных проводов при вариации погодных условий и нагрузки [21–26].

Примерами таких программ, зарегистрированных в Федеральном институте промышленной собственности (ФИПС) с июня по декабрь 2019 года, являются следующие программы:

- тепловой расчет изолированного провода;
- определение потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий с учетом погодных изменений;
- расчет потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий электроэнергетических систем в условиях естественной конвекции с учетом погодных факторов.

Библиографический список

1. Статистический ежегодник мировой энергетики 2020 // Enerdata. URL: <https://yearbook.enerdata.ru> (дата обращения: 26.12.2022).
2. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
3. Об утверждении Стратегии развития электросетевого комплекса Российской Федерации: распоряжение Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р (ред. от 29 ноября 2017 г.). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
4. Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Энергоэффективность и развитие энергетики»: постановление Правительства Российской Федерации от 15 апреля 2014 г. № 321 (ред. от 12 декабря 2022 г.). Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
5. Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016–2020 гг. с перспективой до 2025 г. // ПАО «Россети». URL: https://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation_program.pdf (дата обращения: 26.12.2022).
6. Воротницкий В. Э. Системное решение ключевых проблем электроэнергетики России требует активного участия государства // Энергоэксперт. 2020. № 4. С. 25. EDN: ORLFSR.
7. Шведов Г. В., Сипачева О. В., Савченко О. В. Потери электроэнергии при ее транспорте по электрическим сетям: расчет, анализ, нормирование и снижение. Москва: Издат. дом МЭИ, 2013. 424 с. ISBN 978-5-383-00832-4.
8. Глава «Россетей» Павел Ливинский о выборе между инвестициями и миноритариями: «нужно узаконить дивиденды в тарифе». URL: <https://www.kommersant.ru/doc/3683044> (дата обращения: 26.12.2022).
9. Петухов К. Ю. В сетях с низким уровнем потерь высокая надежность // Российские сети. 2017. № 2. С. 4.
10. Об утверждении нормативов потерь электрической энергии при ее передаче по электрическим сетям территориальных сетевых организаций: Приказ Минэнерго России от 26 сентября 2017 г., № 887. Доступ из справ.-правовой системы «Консультант Плюс».
11. Годовые отчеты // ПАО «Россети Сибирь». URL: <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/> (дата обращения: 26.12.2022).
12. Программа инновационного развития ПАО «Россети Сибирь» на 2020–2024 гг. с перспективой до 2030 г. // ПАО «Россети Сибирь». URL: https://www.rosseti-sib.ru/upload/medialibrary/c28/Programma_innovacionnogo_razvivitiya.pdf (дата обращения: 26.12.2022).
13. Годовые отчеты // ПАО «Россети». URL: <https://www.rosseti.ru/investors/info/year/> (дата обращения: 26.12.2022).
14. Концепция цифровая трансформация 2030 // ПАО «Россети». URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf (дата обращения: 26.12.2022).
15. Goryunov V. N., Girshin S. S., Kuznetsov E. A. [et al.]. A mathematical model of steady-state thermal regime of insulated overhead line conductors // 2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), June 7–10, 2016. Florence, 2016. 7555481. DOI: 10.1109/EEEIC.2016.7555481.
16. Girshin S. S., Bubenchikov A. A., Bubenchikova T. V. [et al.]. Mathematical model of electric energy losses calculating in crosslinked four-wire polyethylene insulated (XLPE) aerial bundled cables // 2016 ELEKTRO, Strbske Pleso. 2016. P. 294–298. DOI: 10.1109/ELEKTRO.2016.7512084.
17. Girshin S. S., Gorjunov V. N., Bigun A. Ya. [et al.]. Overhead power line heating dynamic processes calculation based on the heat transfer quadratic model // 2016 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics). 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/Dynamics.2016.7819013.
18. Girshin S. S. Simplified formula for the load losses of active power in power lines taking into account temperature // Przegląd Elektrotechniczny. 2019. Vol. 95, no. 7. P. 42–46. DOI: 10.15199/48.2019.07.10.
19. Girshin S. S., Bigun Ya., Petrova E. V. [et al.]. Effect of solar radiation on power losses and capacity of insulated and non-insulated wires of overhead power LINES // Przegląd Elektrotechniczny. 2020. Vol. 96, no. 6. P. 59–63. DOI: 10.15199/48.2020.06.11.
20. Воротницкий В. Э. Снижение потерь электроэнергии — важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // Энергосбережение. 2014. № 3. С. 61–64.
21. Гиршин С. С., Петрова Е. В., Ткаченко В. А. [и др.]. Тепловой расчет изолированного провода: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019616964 от 03.06.2019.
22. Гиршин С. С., Ткаченко В. А., Петрова Е. В. [и др.]. Расчет потерь электрической энергии в неизолированных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий в условиях вынужденной конвекции с учетом температуры токопроводящих жил: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019618752 от 04.07.2019.
23. Гиршин С. С., Петрова Е. В., Ткаченко В. А. [и др.]. Расчет потерь электрической энергии в неизолированных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий в условиях естественной конвекции с учетом температуры токопроводящих жил: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019619358 от 16.07.2019.

25. Петрова Е. В. Определение потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий с учетом погодных изменений: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019660200 от 02.08.2019.

26. Петрова Е. В. Расчет потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий электро-энергетических систем в условиях естественной конвекции с учетом погодных факторов: свидетельство о регистрации программы для ЭВМ // Реестр программ для ЭВМ. № 2019619360 от 16.07.2019.

КИСЕЛЁВ Глеб Юрьевич, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 1041-3934

AuthorID (РИНЦ): 1045461

Адрес для переписки: gleb_970519@mail.ru

ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: krivolapov_vladislav@mail.ru

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

ORCID: 0000-0002-0650-1880

Адрес для переписки: stansg@mail.ru

БУБЕНЧИКОВ Антон Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 4357-5273

AuthorID (РИНЦ): 512777

ORCID: 0000-0002-2923-1123

AuthorID (SCOPUS): 57188871772

ResearcherID: D-7850-2014

Адрес для переписки: privetomsk@mail.ru

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

Для цитирования

Киселёв Г. Ю., Троценко В. М., Петрова Е. В., Криволапов В. А., Гиршин С. С., Бубенчиков А. А., Горюнов В. Н. Потери электрической энергии в электрических сетях // Омский научный вестник. 2023. № 1 (185). С. 80–85. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-185-80-85.

Статья поступила в редакцию 10.01.2023 г.

© Г. Ю. Киселёв, В. М. Троценко, Е. В. Петрова,

В. А. Криволапов, С. С. Гиршин, А. А. Бубенчиков,

В. Н. Горюнов