

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СТРУКТУРЫ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОМ СЕТЕВОМ КОМПЛЕКСЕ РОССИИ

COMPARATIVE ANALYSIS OF ELECTRICAL ENERGY LOSS STRUCTURE IN THE DISTRIBUTION NETWORK COMPLEX OF RUSSIA

Ключевые слова: потери электрической энергии, распределительный сетевой комплекс, необходимая валовая выручка, сравнительный анализ, электрические сети, электрические подстанции, необходимая валовая выручка, затраты на обслуживание, индекс-дефлятор.

Величина затрат на распределительный сетевой комплекс (РСК) прямо влияет на стоимость электрической энергии. Одним из видов затрат является оплата потерь электрической энергии на транспортировку. Для минимизации затрат на РСК можно прибегнуть к сокращению потерь электрической энергии. Чтобы эффективно снижать величину потерь электроэнергии, была рассмотрена структура РСК и потерь, затраты сетевых организаций на оплату потерь, а также величина необходимой валовой выручки (НВВ) за период с 2014 г. В РСК России 97% сетей составляют линии 6-10 и 0,4 кВ, 3% 35 кВ и 2% 110 кВ. При этом в категории 6-10 и 0,4 кВ допускается самая большая величина потерь по сравнению с прочими категориями на уровне 10%. Проведен сравнительный анализ структуры потерь электрической энергии с расчетом удельной стоимости оплаты 1% потерь, а также величины доли оплаты потерь по отношению к НВВ за период с 2014 г. Выявлено, что за весь период отпуск электрической энергии снизился на 13,7%, доля затрат оплату потерь в РСК составила около 31% и значительно не изменялась за период исследования. Потери за период исследования снизились с 8,5 до 8,1%, что является незначительным, причем удельная стоимость 1% потерь стабильно растет. Выдвинута гипотеза о том, что рост стоимости потерь вызван инфляцией. Для проверки гипотезы все денежные показатели были приведены к ценам 2014 г. с помощью индексов-дефляторов. В результате было выявлено, что удельная стоимость покупки потерь электроэнергии за исследуемый период изменилась незначительно.

Keywords: electrical energy losses, distribution network complex, required gross revenue, comparative analysis, electrical networks, electrical substations, maintenance costs, deflator index.

The amount of expenditures for the distribution network complex directly influences the cost of electrical energy. One category of expenses is the payment for losses of electrical energy during transportation. To minimize distribution network complex costs, reducing electrical energy losses is a viable approach. To effectively decrease the amount of electrical energy losses, the structure of the distribution network complex and its losses, the expenses of network organizations for loss payments, as well as the required gross revenue since 2014 were examined. In the Russian distribution network complex, 97% of the networks consist of 6-10 kV and 0.4 kV lines; 3% are 35 kV lines, and 2% are 110 kV lines. The lines of 6-10 kV and 0.4 kV categories permit the highest amount of losses compared to other categories - at a level of 10%. Comparative analysis of the structure of electrical energy losses was conducted including the calculation of the specific cost per 1% loss, as well as the proportion of loss payments relative to the gross revenue requirement over the period since 2014. It was found that over the entire period, electrical energy sales decreased by 13.7%, while the share of expenses for loss payments in the distribution network complex remained approximately 31% and showed little variation during the study period. The losses decreased from 8.5% to 8.1% over the study period which was not significant, whereas the specific cost per 1% loss consistently increased. A hypothesis was proposed that the increase in loss costs was caused by inflation. To test this hypothesis, all monetary indices were adjusted to 2014 prices using deflator indices. The results revealed that the specific cost of purchasing electrical energy losses changed insignificantly over the studied period.

Хомутов Станислав Олегович, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: khomutovso@altgtu.ru.

Белицын Игорь Владимирович, к.п.н., доцент, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: b_i_w@mail.ru.

Khomutov Stanislav Olegovich, Dr. Tech. Sci., Prof., Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: khomutovso@altgtu.ru.

Belitsyn Igor Vladimirovich, Cand. Pedagogic Sci., Assoc. Prof., Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: b_i_w@mail.ru.

Сабельников Александр Сергеевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: sabkvd@gmail.com.

Sabelnikov Aleksandr Sergeevich, post-graduate student, Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: sabkvd@gmail.com.

Введение

Развитие электросетевого комплекса России обуславливает применение и внедрение современных технологий. Решение о применении таких технологий во многом зависит от экономической целесообразности внедрения, так как электроэнергетика носит не только коммерческий, но и социальный характер.

Под электросетевым комплексом понимается совокупность объектов электросетевого хозяйства, так или иначе используемая для электроснабжения. Объектами электросетевого хозяйства являются линии электропередачи, электрические подстанции, трансформаторный и распределительные пункты и прочее предназначенное для осуществления электрических связей и осуществления передачи электрической энергии оборудование [1].

Как и любая другая отрасль производства, для нормального функционирования электроэнергетика требует затрат. Из стоимости содержания электросетевого комплекса определяются тарифы на электрическую энергию, которые в свою очередь влияют на конечную стоимость подавляющего большинства производимых продуктов. Сегодня электричество используется во многих сферах жизни.

Таким образом, перед электроэнергетикой стоит задача минимизации затрат при необходимом уровне надежности и качества оказываемых услуг по электроснабжению потребителей [2, 3].

Одним из способов снижения затрат в электроэнергетике является снижение потерь электрической энергии при транспортировке.

Целью исследования является определение потенциала для снижения электрических потерь в РСК России и сетях АПК в целом, в частности определение наиболее перспективной области РСК для разработки способов увеличения энергоэффективности передачи электрической энергии.

Материалы и методы

Для проведения исследования предлагается рассмотреть структуру распределительного сетевого комплекса (РСК) России, чтобы

определить, какие объекты электросетевого хозяйства являются самыми многочисленными. Работа с самыми массовыми объектами позволит увеличить эффективность решения из-за эффекта мультипликации и большей универсальностью решения.

В качестве информации об РСК предлагается использовать данные об общей протяженности всех ЛЭП с разбивкой по уровню напряжения и данные о характеристиках всех трансформаторных подстанциях, например, количестве и трансформаторной мощности. РСК состоит строго из сетей уровня напряжения 0,4-110 кВ.

Далее предлагается выделить допустимую величину технических потерь электрической энергии и сравнить ее с реальной величиной потерь в РСК и сетях АПК для того, что оценить потенциал снижения потерь. Для рассмотрения структуры потерь была использована информация из открытых источников о затратах на содержание РСК в необходимой валовой выручке сетевых организаций. За базовую организацию решено выбрать крупнейшую сетевую компанию ПАО «Россети».

Для проведения сравнительного анализа структуры уровня потерь в РСК нужно рассчитать удельную стоимость 1% потерь по формуле (1) и долю затрат на оплату потерь электроэнергии в структуре НВВ – по формуле (2):

$$C_{уд} = \frac{C_{пот}}{E_{пот}}, \quad (1)$$

где $C_{плата}$ – оплата потерь электрической энергии в РСК за год, млрд руб.;

$E_{пот}$ – средний процент величины потерь в РСК по году, %;

$$E_{уд} = \frac{НВВ}{C_{пот}}, \quad (2)$$

где $НВВ$ – необходимая валовая выручка для содержания РСК в год, млрд руб.

Полученные результаты имеет смысл нормализовать путем дефлирования затрат к уровню 2023 г., после чего провести сравнительный анализ повторно с учетом нормализованных данных.

Результаты и обсуждения

Электросетевой комплекс РФ по функциональному признаку принято делить на системообразующий сетевой комплекс и распределительный сетевой комплекс.

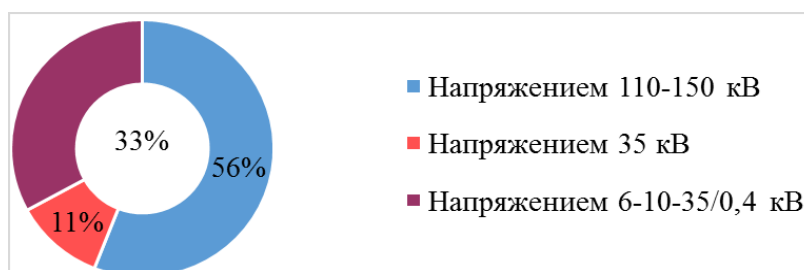
В системообразующий сетевой комплекс входят линии электропередач классом напряжения от 220 до 750 кВ общей протяженностью 164119 км, электрические подстанции напряжением от 220 до 750 кВ в количестве 936 шт. и суммарной трансформаторной мощностью 384933 МВА [4]. Рассмотрим подробнее структуру РСК Российской Федерации на 2021 г. (табл. 1) [4].

Суммарный объем распределительных электрических подстанций напряжением 10(6)/0,4 кВ занимает 97% всех подстанций. Суммарный объем трансформаторной мощности таких подстанций равен одной трети от мощности всех подстанций РСК. Диаграмма распределения количества подстанций представлена на рисунке 1, диаграмма распределения по величине трансформаторной мощности – на рисунке 2.

В среднем на один трансформаторный пункт 6(10)/0,4 кВ приходится 273 кВ установленной трансформаторной мощности.

Таблица 1**Структура РСК РФ**

№ п/п	Распределительные линии электропередачи		Общая протяженность, км
1	ЛЭП напряжением 110-150 кВ		258386
2	ЛЭП напряжением 35 кВ		162919
3	ЛЭП напряжением 6-10 кВ		1011758
4	ЛЭП напряжением 0,4 кВ		849553
Всего			2282615
№ п/п	Распределительные электрические подстанции	Количество, шт.	Трансформаторная мощность, МВА
1	Напряжением 110-150 кВ	7077	246088
2	Напряжением 35 кВ	7384	48781
3	Напряжением 6-10-35/0,4 кВ	530857	144935
Всего		545318	439804

**Рис. 1. Относительное распределение количества распределительных электрических подстанций****Рис. 2. Относительное распределение трансформаторной мощности распределительных электрических подстанций**

Электрические сети АПК состоят преимущественно из ВЛ 0,4-10 кВ, при этом довольно часто это протяженные линии электропередач, питающие малую нагрузку. Административные и технические потери электрической энергии в сетях АПК составляют в среднем от 10 до 15%,

в некоторых ВЛ-0,4 кВ уровень потерь может достигать до 50% [2].

Величина относительных общих потерь электроэнергии, в РСК, находящихся на уровне 4-5%, является не улучшаемой. Максимальная возможная величина потерь, которая обуслав-

ливается технической составляющей, не превышает 10% [5].

РСК ПАО «Россети» включает в себя ЛЭП напряжением 110-0,4 кВ, электрические подстанции и трансформаторные пункты 110-6 кВ. Общая протяженность ЛЭП, в том числе системообразующих, составляет 2,4 млн км. Общее количество ПС и ТП на уровне напряжения 6-35/0,4 кВ 528000 шт. при трансформаторной мощности 809000 МВА [4]. РСК ПАО «Россети» представляется самым многочисленным на территории РФ.

Рассмотрим по годам уровень относительно потерь в РСК ПАО «Россети», включая стоимость оплаты потерь и необходимую валовую выручку на содержание РСК (табл. 2) [6].

Сравнительный анализ данных, представленных в таблице 2, показывает устойчивое снижение уровня потерь электрической энергии и отпуска в сеть. Относительное снижение уровня потерь ЭЭ за исследуемый период в девять лет составило 4,14%, при этом относительное снижение полезного отпуска составило 13,77% по сравнению с 2014 г.

Изучение информации, представленной в таблице 2 и изображенной на рисунках 3-5, показывает устойчивый рост НВВ на содержание

РСК, уровня оплаты потерь. За исследуемый период относительное увеличение НВВ на содержание РСК выросло на 34%, при этом относительная величина оплаты потерь – на 32%. Изменение доли затрат на оплату потерь ЭЭ в структуре НВВ на обслуживание РСК почти не изменилось за исследуемых период.

Из данных таблицы 2 следует, что величина компенсации на оплату технологических потерь в структуре НВВ ПАО «Россети» в среднем находится на уровне 31% и является значительной. Стоимость оплаты 1% потерь в 2021 г. по сравнению с 2014 г. выросла на 35% в относительном выражении.

Для объяснения роста НВВ и стоимости оплаты потерь ЭЭ со временем выдвигается гипотеза о том, что рост затрат мог произойти из-за поправки на инфляцию. Для проверки гипотезы и полноты исследования влияния технологических потерь электроэнергии на структуру НВВ обслуживания РСК приведем затраты из таблицы 2 к ценам декабря 2022 г. методом индексации затрат индексами-дефляторами [7, 8]. Результат приведения сведем в таблицу 3, на основании которого построим графики, представленные на рисунках 6, 7.

Таблица 2

Уровень потерь в распределительном сетевом комплексе ПАО «Россети»

Отчетный период	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Уровень потерь $E_{пот}$, %	8,35	8,47	8,46	8,35	8,39	8,16	8,13	8,12
Отпуск в сеть, млрд кВт·ч	646	630	641	619	600	596	558	557
Оплата потерь РСК $C_{пот}$, млрд руб.	95	101,2	115	111	121	126	136	139,4
НВВ на содержание, млрд руб.	290	313	357	368	404	417	435	440,2
Удельная стоимость 1 % потерь $C_{уд}$, млрд руб.	11,37	11,94	13,59	13,29	14,42	15,44	16,72	17,16
Доля затрат на оплату потерь ЭЭ в структуре НВВ $E_{уд}$, %	33%	32%	32%	30%	30%	30%	31%	32%

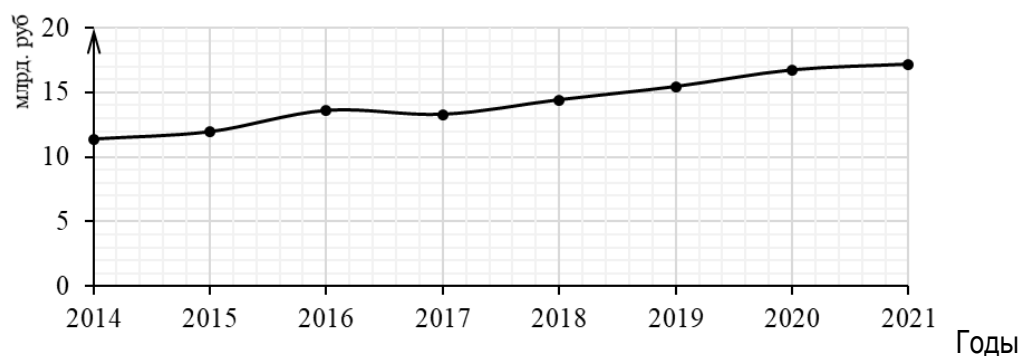


Рис. 3. Удельная стоимость 1% потерь, млрд руб.

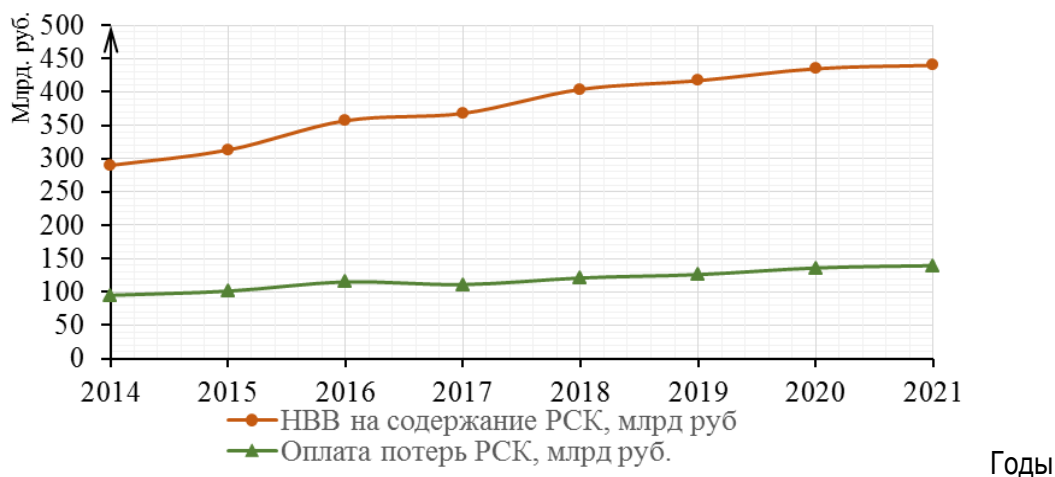


Рис. 4. Изменение НВВ на содержание совмещенной с изменением уровня оплаты потерь в РСК ПАО «Россети»

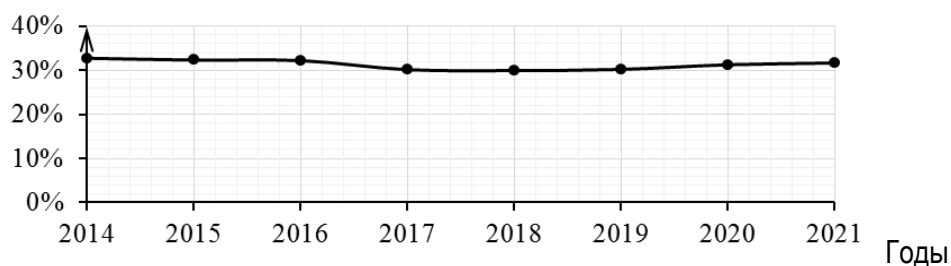


Рис. 5. Изменение доли затрат на оплату потерь ЭЭ в структуре НВВ на обслуживание РСК

Таблица 3

Приведенный уровень затрат на оплату технологических потерь к ценам декабря 2022 г. по РСК ПАО «Россети»

Отчетный период	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.	2021 г.
Уровень потерь, %	8,35	8,47	8,46	8,35	8,39	8,16	8,13	8,12
Индексы-дефляторы к декабрю 2022 г.	1,86	1,67	1,48	1,40	1,37	1,31	1,27	1,21
Затраты на оплату потерь РСК, млрд руб.	176	169	170	156	165	165	173	169
НВВ на содержание РСК, млрд руб.	539	522	527	516	552	547	554	534
Удельная стоимость 1% потерь, млрд руб.	21,13	19,93	20,08	18,64	19,72	20,25	21,29	20,83

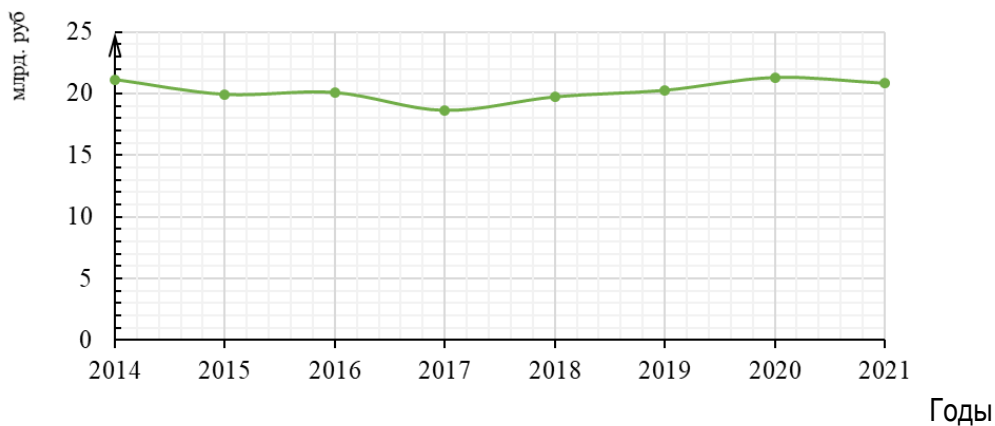


Рис. 6. Удельная приведенная к ценам декабря 2022 г. стоимость 1% потерь

По данным таблицы 3 и графиков, представленных на рисунках 6 и 7, следует вывод о стабильном уровне НВВ на содержание РСК, за-

трат на оплату технологических потерь ЭЭ, не изменяющийся на протяжении 2014-2021 гг.

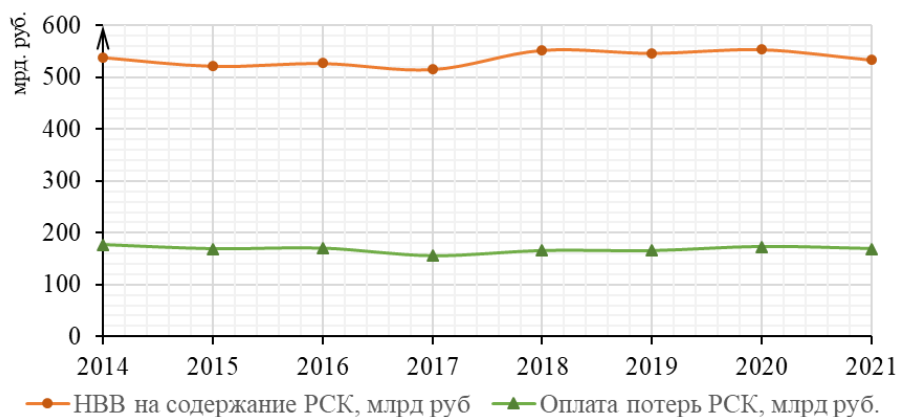


Рис. 7. Изменение НВВ на содержание совмещенных с изменением уровня оплаты потерь в РСК ПАО «Россети», приведенных к ценам декабря 2022 г.

Выводы

1. РСК России на 97% состоит из сетей 0,4-10 кВ и на 67% трансформаторных подстанций до 10 кВ. В этих сетях наблюдаются самые большие потери, в среднем 10-15%, в отдельных сетях – до 50%. При неуклучшаемом уровне технических потерь в 4-5% эти сети имеют наибольший потенциал для снижения потерь.

2. Доля затрат на оплату потерь ЭЭ в 2014-2021 гг. составила в среднем 31% от всей НВВ на содержание РСК, что является значительным. Необходимо рассмотреть мероприятия по снижению стоимости оплаты потерь.

3. Сравнительный анализ структуры потерь показал, что рост затрат на оплату потерь ЭЭ увеличивается только на величину инфляции, как и НВВ на содержание сетей росло только на величину инфляции. Приведение затрат к ценам текущего периода показало отсутствие значимого изменения затрат на содержание РСК. Без дополнительных инвестиций сложно ожидать значительного улучшения ситуации.

4. Общую величину потерь ЭЭ в РСК за 9 лет удалось сократить всего на 0,4 п.п. с 8,5 до 8,1%, что не является значительным. Дополнительные мероприятия по увеличению энергоэффективности передачи электрической энергии могут ускорить динамику снижения потерь.

Библиографический список

1. Федеральный закон «Об электроэнергетике» от 26.03.2003 N 35-ФЗ. – Текст: электронный

// СПС КонсультантПлюс: [сайт]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/?ysclid=m3qrup98jp305106567.

2. Виноградов, А. В. Актуальные вопросы развития электроснабжения АПК / А. В. Виноградов. – Текст: непосредственный // Агротехника и энергообеспечение. – 2022. – № 1 (34). – С. 5-15.

3. Liu, Y., Yang, H., Chen, Q. (2024). Measuring energy-specific technical efficiency based on input distance function. *Energy Efficiency*. 17. DOI: 10.1007/s12053-024-10265-2.

4. Электроэнергетика Содружества Независимых Государств. Ежегодный сборник. – Текст: электронный // Исполнительный комитет Электроэнергетического Совета СНГ: [сайт]. – URL: <http://energo-cis.ru/rumain675/> (дата обращения: 28.02.2023).

5. Овчинников, А. Потери электроэнергии в распределительных сетях 0,4-6 (10) кВ / А. Овчинников. – Текст: электронный // Общероссийский полноцветный журнал «Новости Электротехники» – отраслевое информационно-справочное издание: [сайт]. – URL: http://news.elteh.ru/arh/2003/18_19/08.php (дата обращения: 28.02.2023).

6. Годовые отчёты ПАО «Россети Сибирь» с 2014 по 2021 год. – Текст: электронный // РОССЕТИ СИБИРЬ: [сайт]. – URL: <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/> (дата обращения: 28.02.2023).

7. Индексы потребительских цен по Российской Федерации в 1991-2022 гг. – Текст: электронный // Федеральная служба государственной статистики: [сайт]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ind_potreb_cen_05.html (дата обращения: 28.02.2023).

8. Крылов, Э. И. Анализ влияния инфляции на эффективность инвестиционных проектов / Э. И. Крылов, В. А. Варфоломеева. – Текст: непосредственный // Актуальные проблемы экономики и управления. – 2014. – № 2 (2). – С. 61-66.

References

1. Federalnyi zakon "Ob elektroenergetike" ot 26.03.2003 N 35-FZ (posledniaia redaktsiia) // SPS KonsultantPlus: [sait]. – URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_41502/ (data obrashcheniia: 11.11.2024).

2. Vinogradov, A.V. Aktualnye voprosy razvitiia elektrosnabzheniia APK / A.V. Vinogradov // Agrotehnika i energoobespechenie. – 2022. – No. 1 (34). – S. 5-15.

3. Liu, Y., Yang, H., Chen, Q. (2024). Measuring energy-specific technical efficiency based on input distance function. *Energy Efficiency*. 17. DOI: 10.1007/s12053-024-10265-2.

4. Elektroenergetika Sodruzhestva Nezavisimyykh Gosudarstv. Ezhegodnyi sbornik // Iсполnitelnyi komitet Elektroenergeticheskogo Soveta SNG: [sait]. – URL: <http://energocis.ru/rumain675/> (data obrashcheniia: 28.02.2023).

5. Ovchinnikov, A. Poteri elektroenergii v raspredelitelnykh setiakh 0,4-6 (10) kV / A. Ovchinnikov // Obshcherossiiskii polnotsvetnyi zhurnal "Novosti Elektrotehniki" – otraslevoe informatsionno-spravochnoe izdanie: [sait]. – URL: http://news.elteh.ru/arh/2003/18_19/08.php (data obrashcheniia: 28.02.2023).

6. Godovye otchety PAO "Rosseti Sibir" s 2014 po 2021 god // Rosseti Sibir: [sait]. – URL: <https://www.rosseti-sib.ru/about/dokumenty-about/godovye-otchety/> (data obrashcheniia: 28.02.2023).

7. Indeksy potrebitelskikh tsen po Rossiiskoi Federatsii v 1991-2022 gg. // Federalnaia sluzhba gosudarstvennoi statistiki: [sait]. – URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/ind_potreb_cen_05.html (data obrashcheniia: 28.02.2023).

8. Krylov, E.I. Analiz vliianiia inflitsii na effektivnost investitsionnykh proektov / E.I. Krylov, V.A. Varfolomeeva // Aktualnye problemy ekonomiki i upravleniia. – 2014. – No. 2 (2). – S. 61-66.

