2.4.3. Электроэнергетика
Научная статья
УДК 621.315
https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАЗВИТИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА В СЕТЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Денис Васильевич Петров[1*], Роман Евгеньевич Бережной[2], Ислам Темирбулатович Французов[3]

[1, 2, 3] Северо-Кавказский федеральный университет (д. 1, ул. Пушкина, Ставрополь, 355017, Российская Федерация)
[1] Petrov-danc@mail.ru; https://orcid.org/0009-0004-2408-551X
[2] berezhnoy-roman00@mail.ru; https://orcid.org/0009-0002-8469-6684
[3] islam.franczuzov@bk.ru
* Автор, ответственный за переписку

Аннотация. ***Введение.*** Одной из существенных составляющих потерь в электрических сетях высокого напряжения являются потери на коронный разряд, или «потери на корону», которые могут, в зависимости от уровня напряжения линии и погодных условий, достигать 50 % и выше от общего уровня потерь. Существенным фактором, усиливающим потери на корону, является солнечное ультрафиолетовое излучение. ***Цель***. Исследовать влияние ультрафиолетового спектра излучения на напряжение зажигания коронного разряда. ***Материалы и методы.*** Исследование опирается на аналитический, экспериментальный и статистический методы. ***Результаты и обсуждение.*** Влияние погодных факторов на напряжение зажигания короны и, как следствие, на коронарные потери весьма существенно. При этом в качестве усиливающих коронарные потери факторов рассматривают только осадки или изморось, не затрагивая влияния ультрафиолетового излучения. Проведенные экспериментальные исследования подтверждают гипотезу влияния ультрафиолета на напряжение зажигания коронного разряда и в конечном счете на увеличение коронарных потерь. ***Заключение.*** Потери на корону в высоковольтных сетях при ультрафиолетовом облучении значительно увеличиваются. И при расчете коронарных потерь в сетях высокого напряжения необходимо учитывать двух-, трехкратное увеличение потерь в часы с высоким ультрафиолетовым индексом.

Ключевые слова: напряжение зажигания короны, коронный разряд, потери на корону, ультрафиолетовое излучение
Для цитирования: Петров Д. В., Бережной Р. Е., Французов И. Т. Исследование влияния ультрафиолетового излучения на развитие коронного разряда в сетях высокого напряжения // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2024. № 3 (102). С. 26–32. https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.3
Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Статья поступила в редакцию 19.04.2024;
одобрена после рецензирования 06.05.2024;
принята к публикации 21.05.2024.

Research article

STUDY OF THE EFFECT OF ULTRAVIOLET RADIATION ON THE DEVELOPMENT OF CORONA DISCHARGE IN HIGH VOLTAGE NETWORKS

Denis V. Petrov[1*], Roman E. Berezhnoy[2], Islam T. Frantsuzov[3]

[1, 2, 3] North-Caucasus Federal University (1, Pushkin str., Stavropol, 355017, Russian Federation)
[1] Petrov-danc@mail.ru; https://orcid.org/0009-0004-2408-551X
[2] berezhnoy-roman00@mail.ru; https://orcid.org/0009-0002-8469-6684
[3] islam.franczuzov@bk.ru
* Corresponding author

Abstract. ***Introduction.*** One of the significant components of losses in high-voltage electrical networks is corona discharge losses or "corona losses", which can, depending on the voltage level of the power line and weather conditions, reach 50 % or higher of the total loss level. A significant factor that increases corona losses is solar ultraviolet radiation. ***Goal.*** To investigate the effect of the ultraviolet radiation spectrum on the corona discharge ignition voltage. ***Materials and methods***. The research is based on analytical, experimental and statistical methods. ***Results and discussion***. The influence of weather factors on the corona ignition voltage and, as a result, on coronary losses is significant. At the same time, only precipitation or drizzle are considered as factors that increase coronary losses, without taking into account the influence of ultraviolet radiation. The conducted experimental studies confirm the hypothesis of the effect of ultraviolet radiation on the ignition voltage of the corona discharge and, ultimately, on an increase in coronary losses. ***Conclusion.*** Corona losses in high-voltage networks increase significantly under ultraviolet irradiation. Thus, when calculating coronary losses in high-voltage networks, it is necessary to take into account a two- to three-fold increase in losses in hours with a high ultraviolet index.

Keywords: corona ignition voltage, corona discharge, corona losses, ultraviolet radiation
For citation: Petrov DV, Berezhnoy RE, Frantsuzov IT. Study of the effect of ultraviolet radiation on the development of corona discharge in high voltage networks. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2024;3(102):26-32. (In Russ.). https://doi.org/10.37493/2307-907X.2024.3.3

© Петров Д. В., Бережной Р. Е., Французов И.Т., 2024

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interests.
The article was submitted 19.04.2024;
approved after reviewing 06.05.2024;
accepted for publication 21.05.2024.

Введение / Introduction. Вопросам потерь электрической энергии в сетях посвящено большое количество научных работ. Для нашей страны эта проблема стоит особенно остро ввиду огромной протяженности линий электропередач [1, 2].

При этом возникает ряд проблем как со снижением потерь электрической энергии, так и с точностью их расчета, поскольку на величину потерь влияет большое число различных факторов, которые к тому же могут случайным образом изменяться.

Одной из существенных составляющих потерь в электрических сетях высокого напряжения являются потери на коронный разряд, или «потери на корону», которые могут, в зависимости от уровня напряжения линии и погодных условий, достигать 50 % и выше от общего уровня потерь [3]. Учет данного вида потерь, как и борьбы с ними, на текущий момент очень актуальны.

Коронный разряд, или корона, – это электрический разряд, который возникает в зоне высокого напряжения между проводниками или между проводником и землей при наличии ограниченного объема воздуха или другого газа. В зоне короны происходит искрообразование, что приводит к потере энергии, а иногда и повреждению оборудования [4].

При этом на развитие коронного разряда и вызываемые им потери влияет ряд факторов, таких как:

- уровень напряжения сети;
- форма и диаметр проводов;
- расстояние между проводами;
- погодные условия.

Если первые три фактора при расчете потерь могут с достаточной точностью быть учтены, то учет погодных факторов вызывает затруднения ввиду их изменчивости.

Зачастую при расчете коронарных потерь (или потерь на корону) влияние погодных факторов учитываются соответствующими коэффициентами. При этом для оценочного подсчета среднегодовых потерь все погодные условия разбивают на 4 группы: хорошая погода; дождь (включая мокрый снег и морось); сухой снег; изморозь (включая гололед и иней).

При этом не учитываются часы с высоким ультрафиолетовым индексом, которых по Югу России не менее 400 в год. Повышенный ультрафиолетовый фон способствует ионизации, в том числе многофотонной ионизации воздуха, а также развитию фотоэффекта в голых алюминиевых проводах (красная граница фотоэффекта для алюминия соответствует ультрафиолету спектра В, который присутствует в солнечном изучении у поверхности земли). Все вышесказанное неизбежно снижает напряжение зажигания короны, а следовательно, увеличивает коронарные потери в сетях.

Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.

Оценка влияния ультрафиолетового облучения на напряжение зажигания коронного разряда была проведена при помощи статистического метода. И аналитически было оценено влияние ультрафиолетового облучения на коронарные потери.

Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion. Потери электрической энергии на корону могут быть приближенно оценены формулой Пика, кВт/км·фаза [3]:

$$P = \frac{24{,}1}{\delta}(f + 25)\sqrt{\frac{r_0}{S}}\left(U_Ф - U_0\right)^2 \cdot 10^{-5}, \quad (1)$$

где δ – относительная плотность воздуха; f – частота, Гц; r_0 – радиус одиночного провода, см; S – расстояние между проводами, см; $U_Ф$ – действующее значение фазного напряжения, кВ; U_0 – напряжение зажигания короны, кВ.

Как видно из формулы (1), потери на корону зависят от напряжения зажигания короны, которое, в свою очередь, может быть определено по формуле [4]

$$U_0 = 21{,}2 \cdot \delta \cdot r_0 \cdot ln\frac{S}{r_0} \cdot m_1 \cdot m_2, \quad (2)$$

где m_1 – коэффициент гладкости провода; m_2 – коэффициент погоды.

Для значительных территорий нашей страны большую часть времени занимает первая группа погодных условий (хорошая погода). Однако не учитывается влияние солнечного излучения в часы с высоким ультрафиолетовым индексом, которое в силу усиления ионизационных процессов и фото-

эффекта способно снизить напряжение зажигания короны и увеличить потери. Доля освещенности, приходящаяся на УФ-спектр в солнечном свете, при этом может достигать 7 %, что по уровню освещенности в ясный солнечный день соответствует 5 000…7 000 Лк [6].

Указанная гипотеза влияния ультрафиолетового излучения на напряжение зажигания короны и легла в основу наших исследований. Для подтверждения указанной гипотезы был проведен лабораторный эксперимент на высоковольтном оборудовании.

Для моделирования солнечного облучения был использован кварцевый излучатель с преимущественно жестким ультрафиолетовым спектром длиной волны до 200нм Medicor Q-139. При создании необходимого для развития коронного разряда напряжения использовалась высоковольтная установка АИД-70 с классом точности 2,5. Для фиксирования освещенности в искровом промежутке использовался цифровой люксметр MASTECH MS6610 с классом точности 2,5.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рисунке 1.

Эксперимент проводился следующим образом. После выставления заданного искрового промежутка производился плавный подъем напряжения (не более 2 кВ/с) аппаратом АИД-70 до начала развития коронного разряда. Напряжение начала развития коронного разряда фиксировалось в специальном бланке. Затем напряжение продолжали повышать с той же скоростью до наступления пробоя искрового промежутка. Напряжение пробоя также фиксировалось.

После проведения контрольных замеров напряжения зажигания короны и пробоя в необлученном искровом промежутке облучали искровой промежуток кварцевой лампой Medicor Q-139 и снимали замеры тех же параметров.

Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки, кварцевый излучатель и высоковольтная установка АИД-70 / Fig. 1. General view of the experimental installation, quartz radiator and high-voltage installation AID-70

Освещенность искрового промежутка меняли произвольно, перемещая лампу Medicor Q-139 ближе и дальше от искрового промежутка.

Уровень УФ-освещенности в искровом промежутке измеряли при помощи люксметра MASTECH MS6610.

С целью сохранности чувствительного элемента люксметра он был вынесен на расстояние 0,6 м от искрового промежутка. Поэтому уровень освещенности в месте развития коронного разряда и пробоя оценивался косвенно по формуле

$$E_{расч} = (E - E_{ф})\left[\frac{H}{H-h}\right]^2, \quad (3)$$

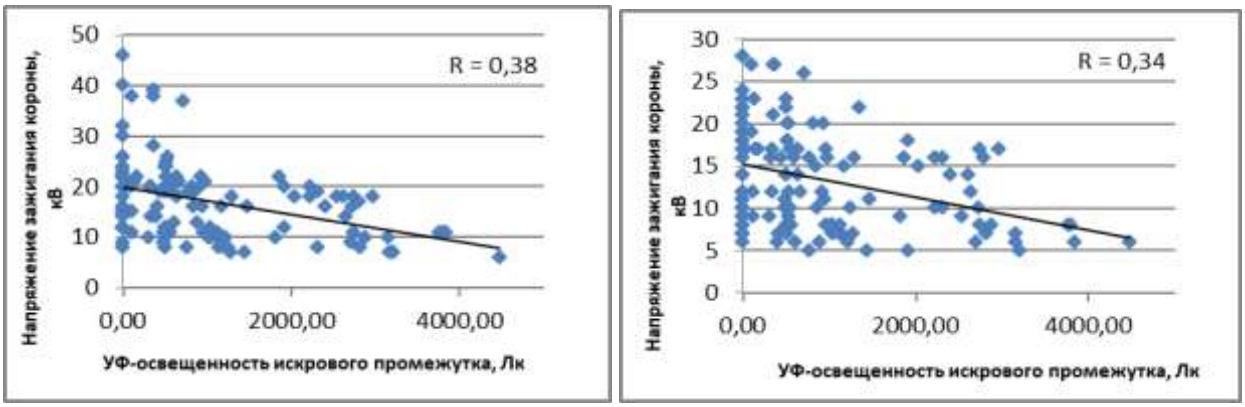
где H – расстояние от излучателя до приемника; h – расстояния от разрядника до приемника; $E_{ф}$ – фоновая освещенность; E – регистрируемая освещенность; $E_{расч}$ – расчетная освещенность.

Эксперимент проводился при нескольких длинах искрового промежутка: 3, 5 и 7 см, и при различных формах электродов, т. е. при различной степени неоднородности электрического поля.

Формы электродов, используемые в эксперименте: сфера – сфера, стержень – сфера, стержень – стержень и стержень – плоскость. Таким образом, мы моделировали несколько форм электрического поля с разной степенью неоднородности. Причем наиболее однородным было поле в системе электродов «сфера – сфера», наиболее неоднородным – в системе «стержень – плоскость».

Эксперимент проводился как для постоянного, так и для переменного напряжения и в каждом случае было проведено более 90 замеров.

В результате эксперимента были получены следующие зависимости (рисунок 2):



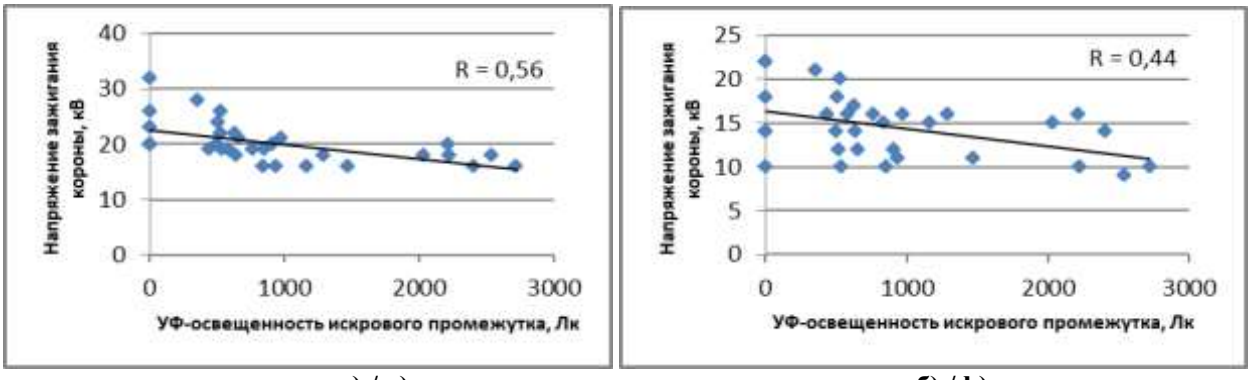
а) / a) **б) / b)**

Рис. 2. Напряжение зажигания короны в зависимости от УФ-освещенности искрового промежутка для постоянного напряжения (а) и для переменного (б) / Fig. 2. The corona ignition voltage depends on the UV illumination of the spark gap for constant voltage (a) and for alternating voltage (b).

Как видно из полученных графиков, между напряжением зажигания короны и УФ-облучением есть некоторая отрицательная корреляционная связь с коэффициентом корреляции R = 0,38 и R = 0,34, соответственно для постоянного и переменного напряжений.

Не смотря на относительную слабость корреляционной связи, p-значимость, при этом составила p = 0,0007 ≪0,05 – для постоянного напряжения и p = 0,0034 ≪0,05 для переменного напряжения. Таким образом, влияние ультрафиолета на развитие коронного разряда имеет место и вероятность случайной связи параметров ничтожно мала [7].

Отдельно стоило исследовать зажигание короны в резко неоднородном поле, т.е. в системе «электрод – земля», которая более всего соответствует форме электрического поля воздушной линии электропередачи (рисунок 3).



а) / a) **б) / b)**

Рис. 3. Напряжение зажигания короны в зависимости от УФ-освещенности в системе «электрод – земля» для постоянного напряжения (а) и для переменного (б) / Fig. 3. The corona ignition voltage depends on the UV illumination in the electrode – ground system for constant voltage (a) and for alternating voltage (b).

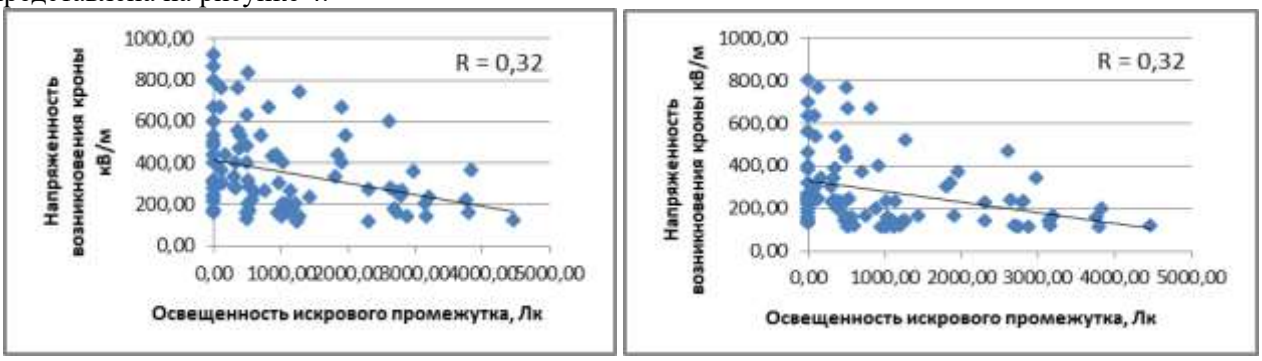
Корреляционная связь в этом случае носит более явный характер: R = 0,56 и R = 0,44, соответственно для постоянного и переменного напряжений. А p-значимость составила p = 0,0009 ≪0,05 – для постоянного напряжения и p = 0,0115<0,05 – для переменного напряжения.

Для оценки влияния напряжения зажигания короны на коронарные потери есть смысл перейти к понятию напряженности возникновения короны и воспользоваться формулой Майра при оценке потерь, кВт/км·фаза:

$$P_к = k \cdot n \cdot f \cdot r_0^2 \cdot E_э (E_э - E_к)\left[2{,}3\lg\frac{1350E_э}{f \cdot r_0} - 1\right] \cdot 10^{-5}, \quad (4)$$

где $P_к$ – потери коронного разряда, кВт/км·фаза, k – коэффициент погоды; n – число проводов в фазе; f – частота, Гц; r_0 – радиус одиночного провода, см; $E_э$ – эквивалентная напряженность, кВ/см; $E_к$ – напряженность возникновения короны, кВ/см.

Как видно из уравнения (4), коронарные потери линейно зависят от напряженности возникновения короны. Зависимость напряженности возникновения короны от интенсивности УФ-облучения представлена на рисунке 4.



а) / a) **б) / b)**

Рис. 4. Напряженность зажигания короны в зависимости от УФ-освещенности в искровом промежутке для постоянного напряжения (а) и для переменного (б) / Fig. 4. The ignition field strength of the corona depends on the UV illumination in the spark gap for constant voltage (a) and for alternating voltage (b).

Из рисунка 4 видно, что корреляционная связь, хоть и слабая, но имеется с коэффициентом корреляции R = 0,32. Однако отвергать такую связь нельзя, поскольку p-значимость при этом составила 0,009 < 0,05 – для постоянного напряжения и 0,0045 ≪0,05 для переменного напряжения.

Таким образом, можно сказать, что, согласно уравнению Майра (4), в часы с высоким ультрафиолетовым индексом потери на корону увеличатся в 2…3 раза. И такое заметное увеличение необходимо учитывать в расчете потерь.

При большом количестве дней с высоким уровнем ультрафиолета, как, например, на Юге России, при расчете коронарных потерь есть необходимость добавить в погодные условия дополнительную погодную группу, учитывающие часы с высоким УФ-индексом.

Возможно, имеет смысл конструктивно защищать провода от солнечной радиации в местах наибольших коронарных потерь, т. е. там, где присутствует наибольшая неоднородность поля (места крепления провода к опоре). Такой подход позволит не только снизить потери на корону, но и увеличить электрическую прочность воздушного промежутка за счет барьерного эффекта [5], что положительно скажется на эксплуатационной надежности линии.

Одновременно в рамках эксперимента было установлено, что УФ-облучение заметно не влияет на электрическую прочность воздуха. Однако в ряде случаев при сильном облучении и резко неоднородном электрическом поле электрическая прочность воздуха значительно увеличивалась, что может быть объяснено частичным ослаблением электрического поля заряженными ионами при развитии коронного разряда. Это явление требует отдельного исследования.

Заключение / Conclusion. Таким образом, экспериментально обнаружено влияние солнечной радиации на развитие коронного разряда, что, как следствие, приведет к увеличению коронарных потерь в сетях высокого напряжения. Напряжение зажигания короны, при облучении ультрафиолетом способно снизиться в 1,5…3 раза, в зависимости от степени неоднородности электрического поля. Наилучшая корреляционная связь между интенсивностью УФ-облучения и напряжением зажигания короны наблюдается при резко неоднородном электрическом поле (система «провод – земля»), которое характерно для реальных воздушных линий электропередачи.

Коронарные потери при линейной зависимости от напряженности зажигания короны в часы с высоким УФ-индексом приближенно могут увеличиться в 2…3 раза. Поэтому при расчете потерь на корону,

особенно в южных регионах РФ, необходима более подробная градация погодных условий, т. е. в погодных коэффициентах учитывать и часы с высоким ультрафиолетовым индексом.

Заметного влияния ультрафиолетового облучения на электрическую прочность воздуха при этом обнаружено не было.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шведов Г. В., Чоршанбиев С. Р., Назиров Х. Б. Структурный анализ потерь электроэнергии в электрических сетях 35-500 кВ Республики Таджикистан // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2018. № 1(41). С. 74–86.
2. Хорольский В. Я., Таранов М. А., Петров Д. В. Технико-экономические расчеты распределительных электрических сетей. М.: Форум, 2015. 96 с.
3. Тамазов А. И. Определение годовых потерь электроэнергии на корону с помощью индекса погоды // Электричество. 2010. № 12. С. 19–28.
4. Лукин А. В., Мельников А. Н. Патент на полезную модель № 196867U1. Российская Федерация. Устройство обнаружения и измерения электрического разряда высоковольтного оборудования. МПК G01R 31/50, G01R 1/07. Заявка № 2020100741 от 09.01.2020. Опубликовано 18.03.2020.
5. Бочаров Ю. Н., Дудкин С. М., Титков В. В. Техника высоких напряжений: учебное пособие. СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. 265 с.
6. Пряхина С. И., Морозова С. В., Гужова Е. И. Методические указания для проведения лабораторных работ по курсу «Метеорология и климатология». Саратов: Наука, 2011. 103 с.
7. Гржибовский А. М. Типы данных, проверка распределения и описательная статистика // Экология человека. 2008. № 1. С. 52–60.

REFERENCES

1. Shvedov GV, Chorshanbiev SR, Nazirov KhB. Structural analysis of electricity losses in 35-500 kV electric networks of the Republic of Tajikistan. Polytechnic Bulletin. Series: Engineering Research. 2018;(1):74-86. (In Russ.).
2. Khorol'skii VYa, Taranov MA, Petrov DV. Technical and economic calculations of electric distribution networks. Moscow: Forum; 2015. 96 p. (In Russ.).
3. Tamazov AI. Determination of annual electricity losses per crown using the weather index. Electricity. 2010;(12):19-28. (In Russ.).
4. Lukin AV, Mel'nikov AN. A patent for a utility model № 196867U1. Russian Federation. Device for detecting and measuring electrical discharge of high-voltage equipment. MPK G01R 31/50, G01R 1/07. Application № 2020100741 dated 09.01.2020. Published on 03.18.2020. (In Russ.).
5. Bocharov YuN, Dudkin SM, Titkov VV. High voltage technique: A study guide. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2013. 265 p. (In Russ.).
6. Pryakhina SI, Morozova SV, Guzhova EI. Methodological guidelines for laboratory work on the course "Meteorology and Climatology". Saratov: Science; 2011. 103 p. (In Russ.).
2. Grzhibovskii AM. Data types, distribution validation, and descriptive statistics. Human ecology. 2008;1:52-60. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Денис Васильевич Петров – кандидат экономических наук, доцент кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института Северо-Кавказского федерального университета. Researcher ID: JXM-1149-2024

Роман Евгеньевич Бережной – студент 2 курса магистратуры, кафедра автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института Северо-Кавказского федерального университета, Researcher ID: IIS-7512-2023.

Ислам Темирбулатович Французов – студент 2 курса магистратуры, кафедра автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения Инженерного института Северо-Кавказского федерального университета.

ВКЛАД АВТОРОВ

Денис Васильевич Петров

Описание теоретических аспектов экспериментального исследования. Проведение эксперимента. Утверждение окончательного варианта структуры и содержания статьи.

Роман Евгеньевич Бережной

Литературный обзор по обозначенной в работе проблеме. Подготовка и редактирование текста статьи. Формирование ее окончательного варианта.

Ислам Темирбулатович Французов

Математическая обработка экспериментальных данных. Построение соответствующих графиков.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Denis V. Petrov – Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor of the Department of Automated electric power systems and power supply, North-Caucasus Federal University. Researcher ID: JXM-1149-2024.

Roman E. Berezhnoy – 2nd year Master Student of the Department of Automated electric power systems and power supply, North-Caucasus Federal University, Researcher ID: IIS-7512-2023.

Islam T. Frantsuzov – 2nd year Master Student of the Department of Automated electric power systems and power supply, North-Caucasus Federal University.

CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Denis V. Petrov

Description of the theoretical aspects of the experimental study. Conducting an experiment. Approval of the final version of the structure and content of the article.

Roman E. Berezhnoy

A literary review of the problem identified in the work. Preparation and editing of the text of the article. The formation of its final version.

Islam T. Frantsuzov

Mathematical processing of experimental data. The construction of appropriate graphs.