

ЭКОНОМИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПОТЕРЬ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ПО ВЫСОКОВОЛЬТНЫМ ПРОВОДАМ В РОССИИ

Е.О. Бакай

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
г. Пермь, Россия*

Линия электропередачи – это система проводов вместе с трассами для прокладки проводов, поддерживающими и монтажными конструкциями, предназначенными для передачи электрической энергии. Линии электропередачи являются связующим элементом в энергосистемах, например, станция – подстанция, подстанция – потребитель и т. д. Потери электроэнергии в проводах зависят от силы тока, чтобы уменьшить потери при передаче на значительные расстояния, напряжение многократно повышают, но с ростом напряжения начинают происходить различные разрядные явления.

Ионизация воздуха вблизи высоковольтных проводов (воздушной линии электропередачи) является причиной возникновения некоторого природного явления – разряда, которое получило название «корона». Коронный разряд, возникающий около высоковольтных проводов, сопровождается необычным звуком, шипением, световым явлением синего цвета, а также образованием озона. Корона часто приводит к образованию коррозии проводов.

Снижение потерь электроэнергии входит в число основных целей, указанных в стратегии развития электросетевого комплекса России. В 2017 году их объем в среднем по стране должен снизиться на 11 % относительно уровня 2012 года.

Цель работы – анализ потерь электроэнергии по стране вследствие возникновения коронного разряда, а также разработка современных, универсальных предложений по уменьшению потерь электроэнергии на корону.

Задачи работы: изучить и обобщить статистические данные по потерям электроэнергии; выявить и охарактеризовать позитивные и негативные тенденции; сформулировать предложения по уменьшению потерь на коронный разряд в воздушной линии электропередачи.

Экономико-статистический анализ потерь электроэнергии по стране будет проведен на основании данных, представленных на сайте Министерства энергетики Российской Федерации, а также другой литературы.

Ключевые слова: развитие, динамика, электроэнергетика, потери электроэнергии, коронный разряд, ЛЭП, экономика, статистика, анализ, электроэнергия.

Введение

Снижение потерь электроэнергии входит в число основных целей, указанных в стратегии развития электросетевого комплекса России [1]. В среднем по стране к 2017 году объем потерь должен снизиться на 11 % относительно уровня 2012 года [2]. Годовые потери электроэнергии на корону в электрических сетях РФ составляют более 4 млрд кВт*ч и если эту величину умножить на стоимость одного кВт*ч, то получится весьма внушительная сумма [3]. Развитие экономики страны сопровождается ростом потребляемой электроэнергии, даже на фоне масштабных мер по энергосбережению и энергоэффективности [4, 5], поэтому просто необходимо бороться со столь значительными потерями на корону.

Динамика потерь электроэнергии в электрических сетях страны за 1994–2013 гг. представлена в табл. 1. В таблице приведены показатели электробаланса энергии, отпуск электроэнергии в сеть, потери электроэнергии и относительные потери электроэнергии.

Для наглядности покажем относительные потери электроэнергии в виде графика (рис. 1).

Из рис. 1 видно, что средние относительные потери электроэнергии составляют 11 %, увеличение потерь наблюдалось в период 1997–2006 гг., затем потери пошли на спад.

Рассчитаем средний темп роста потерь электроэнергии от отпуска в сеть за 2007–2013 гг.:

$$X^- = \sqrt{X_1 * X_2 * X_N},$$

где $X_1 * X_2 * X_N$ – коэффициенты роста с переменной базой [8–10].

$$X^- = \sqrt{\frac{11,43}{11,18} * \frac{11,79}{11,43} * \frac{11,81}{11,79} * \frac{11,53}{11,81} * \frac{11,46}{11,53} * \frac{11,77}{11,46}} = 1,026 \%$$

Основная часть

В основном, потери на корону зависят от уровня рабочего напряжения сети, сечения проводов и конструкции фазы, но главным образом от вида погоды [11].

Потери на корону при тумане и изморози возрастают в десятки раз по сравнению с потерями при хорошей погоде. Именно поэтому одной из самых главных задач электроснабжения является создание таких условий, при которых передача электрической энергии по линиям электропередач будет экономичной, эффективной и надёжной [12].

Таблица 1
Динамика потерь электроэнергии в электрических сетях Российской Федерации за 1994–2013 гг. [6, 7]

| Показатели электро-баланса энергии | Производство электроэнергии | Отпуск электроэнергии в сеть | Потери электроэнергии абсолютные | Потери электроэнергии относительные | | |
|---|-----------------------------|------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|-----------------|-------|
| | | | | от отпуска в сеть | от производства | |
| ед. измерения | млрд кВт*ч | млрд кВт*ч | млрд кВт*ч | % | % | |
| Численные значения показателей по годам | 1994 | 875,9 | 794,7 | 79 | 9,94 | 9,02 |
| | 1995 | 860 | 781,8 | 83,5 | 10,68 | 9,71 |
| | 1996 | 847,2 | 766,8 | 84,2 | 10,98 | 9,94 |
| | 1997 | 833,9 | 753,6 | 84,4 | 11,2 | 10,12 |
| | 1998 | 826,1 | 750,3 | 93,3 | 12,44 | 11,28 |
| | 1999 | 845,5 | 772,9 | 96,8 | 12,52 | 11,44 |
| | 2000 | 876 | 803,5 | 101,6 | 12,64 | 11,59 |
| | 2001 | 891,3 | 816,9 | 105,51 | 12,91 | 11,84 |
| | 2002 | 891,3 | 819,9 | 107,5 | 13,11 | 12,06 |
| | 2003 | 916,3 | 812,7 | 110,5 | 13,11 | 12,06 |
| | 2004 | 931,9 | 864,9 | 112,6 | 13,02 | 12,08 |
| | 2005 | 953,1 | 875,7 | 112,6 | 12,86 | 11,81 |
| | 2006 | 995,8 | 911,5 | 107,6 | 11,8 | 10,81 |
| | 2007 | 1015,33 | 937,46 | 104,86 | 11,18 | 10,33 |
| | 2008 | 1018,0 | 955,35 | 109,24 | 11,43 | 10,50 |
| | 2009 | 1040 | 965 | 113,9 | 11,79 | 10,95 |
| | 2010 | 1037 | 963 | 113,76 | 11,81 | 10,96 |
| | 2011 | 1053 | 980 | 113,01 | 11,53 | 10,73 |
| 2012 | 1064 | 990 | 113,48 | 11,46 | 10,66 | |
| 2013 | 1045 | 975 | 114,8 | 11,77 | 10,98 | |

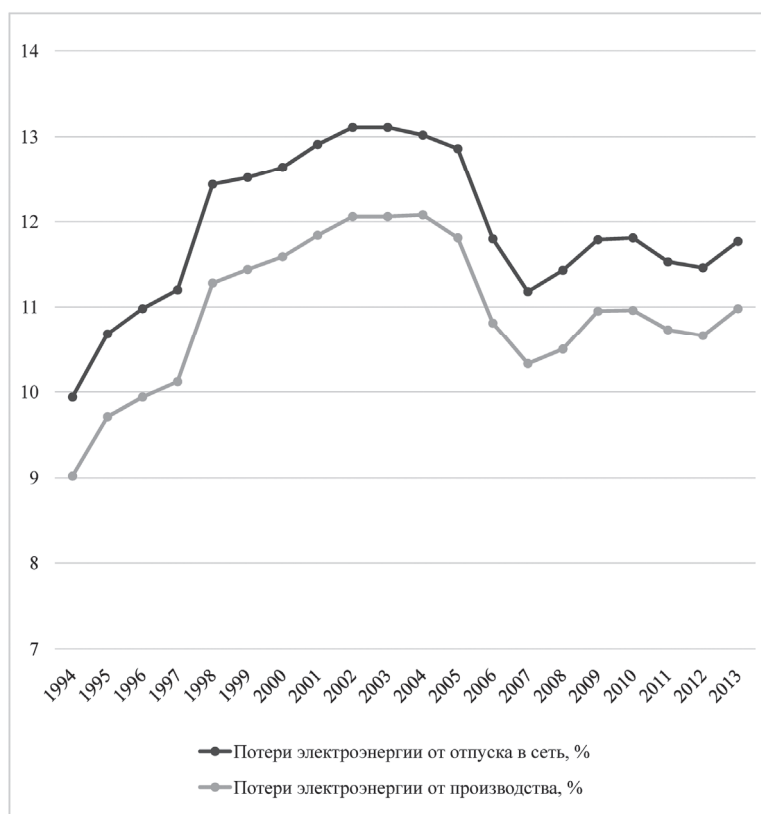


Рис. 1. Относительные потери электроэнергии в России, % [6]

Наиболее остро проблема потерь стоит в сетях 220 кВ и выше, что при их малой загруженности в настоящее время связано не столько с потерями в проводах от токов нагрузки, сколько с потерями на корону [14].

В среднем в год потери мощности и энергии на коронный разряд ВЛ напряжением 330 кВ и напряжением 500 кВ составляют 12 %, а ВЛ напряжением 750 кВ – около 14 % от суммарных потерь [5, 15].

Так как в действительности средние нагрузки ВЛ раза в два меньше натуральной мощности, то потери на корону ВЛ напряжением 330 кВ и напряжением 500 кВ составят 35 %, а ВЛ напряжением 750 кВ около 39 % от суммарных потерь (рис. 2, 3).

Для ЛЭП характерна потеря активной мощности на нагрев проводов при протекании тока по ним в связи с наличием сопротивления проводов

ЛЭП. Чем больше ток или сопротивление ЛЭП, тем больше потери мощности и напряжения [17, 18].

При передаче электроэнергии на дальние расстояния напряжение многократно повышают с помощью трансформаторов, для того чтобы уменьшить силу тока, из-за того, что потери электроэнергии в проводах зависят от силы тока. Эти мероприятия позволяют значительно снизить потери, однако с ростом напряжения начинают происходить различные разрядные явления.

В ВЛЭП сверхвысокого напряжения присутствуют потери активной мощности на корону (коронный разряд).

Одной из составляющих потерь в линиях электропередачи сверхвысокого напряжения 750, 500, 330 и 220 кВ являются потери на коронный разряд.

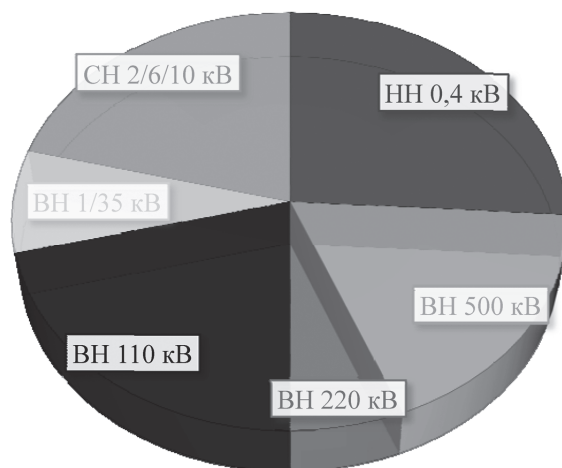


Рис. 2. Потери электроэнергии в сетях с различными уровнями напряжения в стране [13]

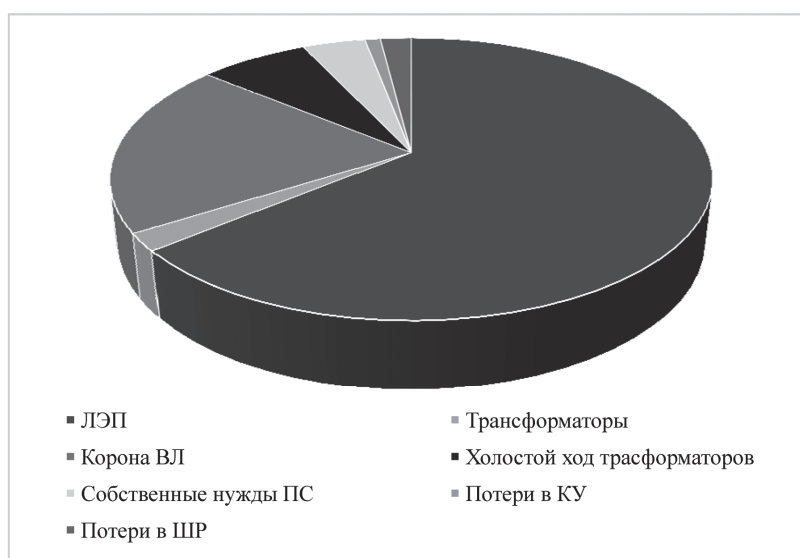


Рис. 3. Среднестатистические составляющие структуры технических потерь электроэнергии в электрических сетях страны [16]

Коронный разряд на проводах ВЛ приводит к потерям электроэнергии, вызывает значительный слышимый шум, радиопомехи, свечение, продуцирование озона и повреждения изоляции линий электропередачи.

К типовым мероприятиям по снижению потерь на корону относятся:

- 1) увеличение диаметра провода, расщепление провода;

- 2) регулирование напряжения и др.

К инновационным способам снижения потерь на корону можно отнести:

- 1) изменение поверхности провода;

- 2) изменение сплава провода и его структуры;

- 3) нанесение специальных покрытий на внешнюю поверхность провода и пр.

Учитывая, что замена проводов на большее сечение или изменение конструкции фазы связаны фактически с полной реконструкцией ВЛЭП, в настоящий момент могут быть выделены два основных направления работы с обоснованными затратами:

- 1) совершенствование систем регулирования напряжения на подстанциях и электростанциях;

- 2) замена проводов на провода аналогичного сечения со сниженными потерями или доработка проводов для снижения потерь.

Максимальные потери на корону характерны для повышенных напряжений на ВЛЭП при слабой их нагрузке, а также при плохой погоде. В условиях слабой нагрузки ВЛ, когда напряжение в линии превосходит номинальное на 5 % и выше, регулированием напряжения можно понизить потери электроэнергии в сети более чем на 30 %. Потери мощности на корону в хорошую погоду невелики. Поэтому напряжение, с целью снижения потерь на корону, целесообразно регулировать в плохую погоду, когда потери на корону возрастают на 1–2 порядка, а продолжительность этих потерь составляет 1–2 тысячи часов и более.

Покажем графически как меняются потери на коронный разряд при напряжении 750 кВ в различную погоду (рис. 4).

Рассмотрим диаграмму, выражающую зависимость потерь энергии на корону от видов погоды (рис. 5).

Из диаграммы видно, что максимальные потери наблюдаются при изморози при напряжении в 750 кВ.

Планирование режимов с учетом потерь на корону сталкивается со значительными трудностями ввиду того, что погода носит вероятностный характер, а также сильно сказываются условия прохождения каждой линии. Чтобы осуществлять оперативное управление напряжением в сети, необходимо иметь текущие и прогнозные значения потерь в проводах и на корону, кроме того, необходимо учитывать условия нагрева и охлаждения проводов ВЛ. Так, при безветренной погоде на

солнце температура провода может увеличиться более чем на 20 °С по отношению к температуре воздуха. Поэтому планирование режимов с учетом потерь на корону в настоящее время только прорабатывается.

Регулирование напряжения на ВЛ 500 кВ при плохой погоде со среднеэксплуатационным напряжением 515 кВ, при его снижении до 500 кВ, позволяет снизить потери на корону на 10–15 % или ещё более. Также экспериментальным путём установлено, что на разных ВЛ 500 кВ длиной более 100 км экономия электроэнергии от регулирования напряжения может составить более 5 млн кВтч в год, что весьма существенно с экономической точки зрения и перспективно.

Для снижения напряжения могут быть использованы средства реактивной мощности, к которым относятся шунтирующие реакторы, синхронные компенсаторы и статические тиристоры компенсаторы [11, 12].

Регулирование напряжения на электростанциях, с целью снижения потерь, в том числе на корону, является крайне перспективным и востребованным мероприятием для снижения потерь.

В моменты плохой погоды (высокая влажность, изморозь, гололёд, осадки), которая составляет от 10 до 20 % от всего времени в году, расходуется более 80 % всех потерь на корону (табл. 2). Одним из перспективных решений для борьбы с коронным разрядом является получение и нанесение защитных покрытий, на поверхности которых не образуются капли при дожде и изморозь. В таком случае потери на корону могут быть снижены на величину порядка 50 % или 15–20 % от всех потерь в ЛЭП.

Эффект короны существенно различно проявляется при различных осадках. При этом потери мощности на корону в зависимости от вида погоды также связаны как с изменением радиуса кривизны провода, так и с напряженностью поля и условий её образования (влажность, давление, температура). Наиболее низкие потери наблюдаются при сухой погоде на чистом проводе, тогда как при наличии отложений на проводе интенсивность коронного разряда резко увеличивается. Так, при дожде и изморози потери на корону могут увеличиться в 10–20 раз.

Очевидной становится идея уменьшить потери мощности при передаче электроэнергии за счет механизма уменьшения потерь на корону до уровня потерь при хорошей погоде, а именно исключение возможности образования на поверхности провода капель воды и изморози.

В результате проводимых исследований было установлено, что задачу по устранению или заметному снижению капель с поверхности можно решить двумя путями: придание поверхности супергидрофобных (невозможность образования капель ввиду эффекта поверхностного натяжения) или

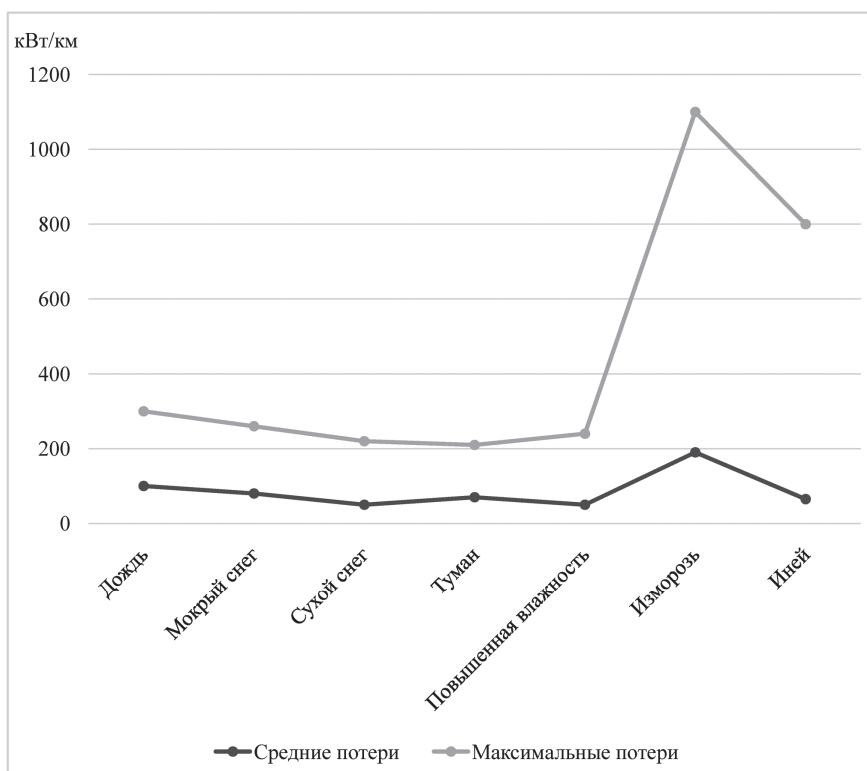


Рис. 4. График потерь мощности на корону в линии электропередачи напряжением 750 кВ при различной погоде [19].

Таблица 2

Средние по России удельные потери мощности и энергии на корону ВЛ [15, 19, 20]

| Вид погоды | Продолжительность, ч | Потери мощности ВЛ, Вт/м | | | | Потери энергии ВЛ, Вт*ч/м | | | |
|------------------------------|----------------------|--------------------------|-----|------|-----|---------------------------|-------|--------|--------|
| | | 220 | 330 | 500 | 750 | 220 | 330 | 500 | 750 |
| Хорошая | 5159 | 0,3 | 1,5 | 2,4 | 5,7 | 1548 | 7738 | 12382 | 29406 |
| Повышенная влажность | 746 | 1,7 | 5,4 | 8,4 | 19 | 1268 | 4028 | 6266 | 14174 |
| Снег | 807 | 2,3 | 6,6 | 12,4 | 25 | 1856 | 5326 | 10007 | 20175 |
| Туман | 190 | 3,2 | 10 | 16,4 | 34 | 608 | 1900 | 3116 | 6460 |
| Дождь | 395 | 6 | 16 | 30 | 67 | 2370 | 7616 | 14280 | 31892 |
| Изморозь | 1381 | 13 | 36 | 59,2 | 116 | 17953 | 49716 | 81755 | 160196 |
| Среднегодовые потери, Вт*ч/м | | | | | | 25603 | 76324 | 127806 | 262303 |

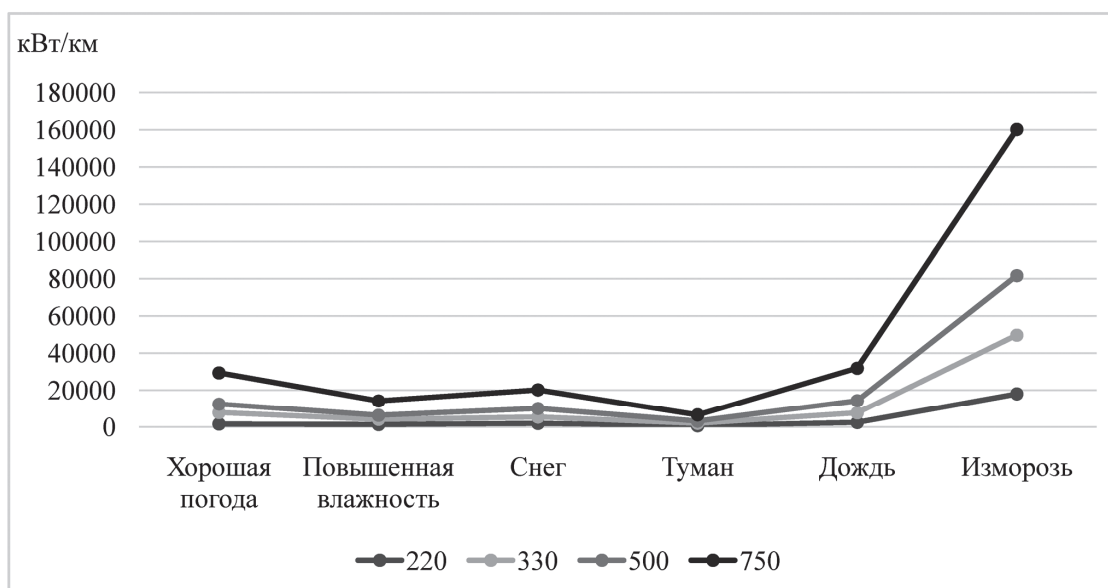


Рис. 5. График зависимости потерь энергии на корону от видов погоды при различном высоком напряжении [15]

супер-гидрофильных свойств (равномерное смачивание вдоль всего провода тонкой пленкой).

В заключение можно отметить, что внедрение технических, технологических и организационных решений, связанных со снижением потерь электроэнергии в электрических сетях, способно решить множество проблем, как экономического, так и государственного масштаба, обеспечить энергоэффективность всей системы энергоснабжения Российской Федерации.

Литература

1. Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. Официальный сайт Министерства энергетики РФ. – <http://www.minenergo.gov.ru/node/1920> (дата обращения 09.06.2017).
2. «Потерять нельзя сэкономить», приложение к газете «Коммерсантъ», № 83 от 20.05.2013 г. – <https://www.kommersant.ru/doc/2189201> (дата обращения 03.07.2017).
3. Беляева, Л.А. Оценка потерь электроэнергии на корону по данным телеметрии / Л.А. Беляева, Б.Г. Булатов. – <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-poter-elektroenergii-na-koronu-po-dannym-telemetrii> (дата обращения 10.06.2017).
4. Баркин, О.Г. Электроэнергетика Российской Федерации: текущий статус, возможные сценарии, развилки выбора, целевое видение / О.Г. Баркин // Эффективное антикризисное управление. – 2011. – № 3 (66). – С. 34–41.
5. Краткие месячные отчеты Министерства энергетики РФ о функционировании электроэнергетики. – <https://minenergo.gov.ru/node/4858> (дата обращения 26.06.2017).
6. Снижение потерь электроэнергии. Стратегический путь повышения энергоэффективно-

сти сетей. Новости электроники. Информационно-справочное издание. – <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/93/05.php> (дата обращения 20.06.2017)

7. Отчет о функционировании электроэнергетики в 2016 году. – <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/4858/71298> (дата обращения 27.06.2017)

8. Ефимова, М.Р. Общая теория статистики / М.Р. Ефимова, Е.В. Петрова, В.Н. Румянцев. – М.: ИНФРА-М, 2006. – 416 с.

9. Ефимова, М.Р. Практикум по общей теории статистики: учеб. пособие / М.Р. Ефимова, О.И. Ганченко, Е.В. Петрова. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 336 с.

10. Кобозев, А.В. Статистика: методические указания / А.В. Кобозев, А.В. Кобозева. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2011. – Ч. 1. – 34 с.

11. Капцов, Н.А. Коронный разряд / Н. А. Капцов. – М.: ОГИЗ Гостехиздат, 1947. – 256 с.

12. Левитов, В.И. Корона переменного тока / В.И. Левитов. – М.: Энергия, 1975. – 280 с.

13. Электроэнергетика России: основные показатели функционирования и тенденции развития. Стратегический путь повышения энергоэффективности сетей. – https://www.hse.ru/data/2015/05/24/1097192707/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8.pdf (дата обращения 22.06.2017).

14. Попков, В.И. Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения / В.И. Попков. – М.: Наука, 1990. – 253 с.

15. Потери на корону и их снижение в сетях 220 КВ и выше. Путеводитель по Энергетике. – <http://pue8.ru/elektricheskie-seti/628-poteri-na-koronu-i-ikh-snizhenie-v-setyakh-220-kv-i-vyshe.html> (дата обращения 19.06.2017).

16. Снижение потерь электроэнергии при внедрении Smart Grid. Портал RusCable.Ru. – http://eep.ru/article/Snizhenie_poter_elektroenergii_pri_vnedrenii/ (дата обращения 18.06.2017).

17. Баланчевадзе, В.И. Энергетика сегодня и завтра / В.И. Баланчевадзе, А.И. Барановский; под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

18. Кириллин, В.А. Энергетика. Главные про-

блемы: в вопросах и ответах / В.А. Кириллин. – М.: Знание, 1990.

19. Тамазов, А.И. О проблемах расчёта потерь на корону воздушных линий электропередачи / А.И. Тамазов. – https://portalenergetika.com/articles/o_problemah_rascheta_poter_na_koronu_vo_zdushnyih liniy_elektroperedachi_35 (дата обращения 25.06.2017).

20. Железко, Ю.С. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов / Ю.С. Железко, А.В. Артемьев, О.В. Савченко. – М.: Изд-во НЦ ЭН АС, 2003. – 280 с.

Бакай Егор Олегович, студент, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (г. Пермь), egorbakay@mail.ru

Поступила в редакцию 12 октября 2017 г.

DOI: 10.14529/em170416

ECONOMIC AND STATISTICAL ANALYSIS OF LOSSES IN ELECTRICITY TRANSMISSION ON HIGH-VOLTAGE WIRES IN RUSSIA

E.O. Bakai

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Power transmission line is a system of wires along with routes for laying wires, supporting and mounting structures intended for the transmission of electrical energy. Power lines are a connecting element in power systems, for example, station-substation, substation-consumer, etc.

The loss of electric power in the wires depends on the current intensity; in order to reduce transmission losses over considerable distances, the voltage is repeatedly increased, but with different voltage, various discharge phenomena begin to occur.

Ionization of air near high-voltage wires (overhead transmission line) is the reason for the occurrence of some natural phenomenon - a discharge, which was called the "corona" (crown). The corona discharge, which occurs near high-voltage wires, is accompanied by an unusual sound, a hiss, a light phenomenon of blue color, and the formation of ozone. The corona often leads to corrosion of wires.

Decrease in losses of electric power is one of the main goals indicated in the strategy of development of the power grid complex in Russia. In 2017, their volume in the national average should decrease by 11% compared to the level of 2012.

The goal of the work is to analyze the losses of electric power throughout the country due to the appearance of corona discharge, as well as the development of modern, universal proposals to reduce the loss of electric power to the corona.

Objectives of the work: to study and summarize statistical data on energy losses; identify and characterize positive and negative trends; formulate proposals to reduce losses to the corona discharge in the overhead power transmission line.

The economic and statistical analysis of electricity losses in the country will be carried out on the basis of the data presented on the website of the Ministry of Energy of the Russian Federation, as well as other literature.

Keywords: development, dynamics, electric power industry, power losses, corona discharge, power lines, economy, statistics, analysis, electric power.

References

1. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035 goda. Ofitsial'nyy sayt Ministerstva energetiki RF* [Energy strategy of Russia for the period up to 2035. Official site of the Ministry of Energy of the Russian Federation]. Available at: <http://www.minenergo.gov.ru/node/1920> (accessed 09.06.2017).
2. "Poteryat' nel'zya sekonomit'", *prilozhenie k gazete "Kommersant"* ["You cannot lose money", the supplement to the newspaper Kommersant], no. 83 ot 20.05.2013 g. Available at: <https://www.kommersant.ru/doc/2189201> (accessed 03.07.2017).
3. Belyaeva L.A., Bulatov B.G. *Otsenka poter' elektroenergii na koronu po dannym telemektrii* [Estimation of electric power losses on the corona according to telemetry data]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-poter-elektroenergii-na-koronu-po-dannym-telemektrii> (accessed 10.06.2017).
4. Barkin O.G. [Electric power industry of the Russian Federation: current status, possible scenarios, options of choice, target vision]. *Effektivnoe antikrizisnoe upravlenie* [Effective anti-crisis management], 2011, no. 3 (66), pp. 34–41. (in Russ.)
5. *Kratkie mesyachnye otchety Ministerstva energetiki RF o funktsionirovanii elektroenergetiki* [Brief monthly reports of the Ministry of Energy of the Russian Federation on the functioning of the electric power industry]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/4858> (accessed 26.06.2017).
6. *Snizhenie poter' elektroenergii. Strategicheskii put' povysheniya energoeffektivnosti setey. Novosti elektroniki. Informatsionno-spravochnoe izdanie* [Reduction of power losses. A strategic way to increase the energy efficiency of networks. Electronics news. Information and reference edition]. Available at: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/93/05.php> (accessed 20.06.2017)
7. *Otchet o funktsionirovanii elektroenergetiki v 2016 godu* [Report on the functioning of the electric power industry in 2016]. Available at: <https://minenergo.gov.ru/system/download-pdf/4858/71298> (accessed 27.06.2017)
8. Efimova M.R., Petrova E.V., Rumyantsev V.N. *Obshchaya teoriya statistiki* [General Theory of Statistics]. Moscow, 2006. 416 p.
9. Efimova M.R., Ganchenko O.I., Petrova E.V. *Praktikum po obshchey teorii statistiki* [Workshop on the General Theory of Statistics]. Moscow, 2005. 336 p.
10. Kobozev A.V., Kobozeva A.V. *Statistika: metodicheskie ukazaniya* [Statistics: guidelines]. Khabarovsk, 2011. Ch. 1. 34 p.
11. Kaptsov N.A. *Koronnyy razryad* [Corona discharge]. Moscow, 1947. 256 p.
12. Levitov V.I. *Korona peremennogo toka* [Alternating current corona]. Moscow, 1975. 280 p.
13. *Elektroenergetika Rossii: osnovnye pokazateli funktsionirovaniya i tendentsii razvitiya. Strategicheskii put' povysheniya energoeffektivnosti setey* [Power engineering in Russia: basic performance indicators and development trends. A strategic way to increase the energy efficiency of networks]. Available at: https://www.hse.ru/data/2015/05/24/1097192707/%D0%94%D0%BE%D0%BA%D0%BB%D0%B0%D0%B4_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%8D%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B5%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0%20%D0%A0%D0%BE%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%B8.pdf (accessed 22.06.2017).
14. Popkov V.I. *Koronnyy razryad i linii sverkhvysokogo napryazheniya* [Corona discharge and ultrahigh voltage lines]. Moscow, 1990. 253 p.
15. *Poteri na koronu i ikh snizhenie v setyakh 220 KV i vyshe. Putevoditel' po Energetike* [Losses on the corona and their decrease in 220 kV and above. Guide to Power Engineering]. Available at: <http://pue8.ru/elektricheskie-seti/628-poteri-na-koronu-i-ikh-snizhenie-v-setyakh-220-kv-i-vyshe.html> (accessed 19.06.2017).
16. *Snizhenie poter' elektroenergii pri vnedrenii Smart Grid. Portal RusCable.Ru* [Reduction of power losses during the implementation of Smart Grid. Portal RusCable.Ru]. Available at: http://eepr.ru/article/Snizhenie_poter_elektroenergii_pri_vnedrenii/ (accessed 18.06.2017).
17. Balanchevadze V.I., Baranovskiy A.I. *Energetika segodnya i zavtra* [Power engineering: today and tomorrow]. Moscow, 1990.
18. Kirillin V.A. *Energetika. Glavnye problemy: v voprosakh i otvetakh* [Power engineering. The main problems in questions and answers]. Moscow, 1990.
19. Tamazov A.I. *O problemakh rascheta poter' na koronu vozdukhnykh liniy elektroperedachi* [On the problems of calculation of losses on the corona of overhead transmission lines]. Available at: https://portalenergetika.com/articles/o_probleмах_rascheta_poter_na_koronu__vozdukhnykh_linii_elektroperedachi_35 (accessed 25.06.2017).

20. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. *Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v elektricheskikh setyakh: Rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Calculation, analysis and normalization of electricity losses in electrical networks: A guide for practical calculations]. Moscow, 2003. 280 p.

Egor O. Bakai, student of Perm National Research Polytechnic University, Perm, egorbakay@mail.ru

Received 12 October 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Бакай, Е.О. Экономико-статистический анализ потерь при передаче электроэнергии по высоковольтным проводам в России / Е.О. Бакай // Вестник ЮУрГУ. Серия «Экономика и менеджмент». – 2017. – Т. 11, № 4. – С. 117–125. DOI: 10.14529/em170416

FOR CITATION

Bakai E.O. Economic and Statistical Analysis of Losses in Electricity Transmission on High-Voltage Wires in Russia. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Economics and Management*, 2017, vol. 11, no. 4, pp. 117–125. (in Russ.). DOI: 10.14529/em170416
