

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32>

УДК 621.31+004.89+621.396.67.095.3

Расчет и анализ удельных потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических данных

Д. А. Секацкий¹⁾, Н. А. Попкова¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2024
Belarusian National Technical University, 2024

Реферат. Корректное использование погодных данных для расчетов потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях (ВЛ) электропередачи весьма трудная задача. Одной из существенных причин этого являлась точность определения погодных условий и применение этого прогноза для расчета протяженных ВЛ. В СССР (Союз Советских Социалистических Республик) на основе натурных испытаний и экспериментальных данных были разработаны рекомендации по учету потерь электрической энергии на корону и помех в ВЛ электропередачи, средние значения которых приведены в действующей инструкции по нормированию и обоснованию норматива расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям. Согласно этому нормативному документу удельные расходы активной мощности на корону в воздушных линиях, усредненные по конструкции, определяются в зависимости от погодных условий, которые разделены на четыре группы. В данной работе оценено влияние потерь активной мощности на корону с использованием различных факторов на примере воздушных линий высокого напряжения основных электрических сетей различного номинального напряжения Республики Беларусь. Построены и смоделированы зависимости потерь активной мощности на коронирование с учетом разных климатических и погодных условий, наблюдаемых в стране. Определение метеорологических параметров основано на анализе погодных данных и закономерностей типов погодных условий. Для повышения точности расчета удельных потерь активной мощности на коронирование рассмотрены все возможные погодные условия, а также их сочетания, а в дальнейшем проведена их обработка и приведение к одному из четырех типов погоды. Предложен и представлен метод определения потерь электроэнергии на коронирование в ВЛ, основанный на среднестатистической относительной плотности воздуха и геометрических параметрах преобладающего участка ВЛ. Показано, что применение исключительно номинального напряжения может привести к погрешностям определения как удельного, так и фактического значения потерь активной мощности на коронирование.

Ключевые слова: удельные потери активной мощности, погодные условия, коронный разряд, напряженность электрического поля, линии электропередачи, электроэнергетическая система

Для цитирования: Секацкий, Д. А. Расчет и анализ удельных потерь активной мощности на коронирование в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических данных / Д. А. Секацкий, Н. А. Попкова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 1. С. 16–32. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32>

Адрес для переписки

Секацкий Дмитрий Александрович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 392-65-82
dsekatski@gmail.com

Address for correspondence

Sekatski Dzmitry A.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosti Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 392-65-82
dsekatski@gmail.com

Calculation and Analysis of Specific Losses of Active Power in Overhead Power Lines due to Corona in View of Climatic Data

D. A. Sekatski¹⁾, N. A. Papkova¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. It is a very challenging task to correctly use weather data to calculate the active power loss due to corona in overhead power lines. One of the significant reasons for this was the problem of accuracy of determining weather conditions and the use of the forecast for calculating extended overhead lines. In the USSR (Union of Soviet Socialist Republics), based on field tests and experimental data, recommendations were developed for accounting for losses of electric energy due to corona and interference in overhead lines, the average values of which were given in the relevant instruction for the regulation and justification of the norm of electricity consumption for its transmission over electric networks. According to this regulatory document, the specific cost of active power due to corona in overhead lines, averaged by design, was determined depending on weather conditions, which were divided into four groups. In this paper, the effect of active power losses on corona is estimated using various factors on the example of high-voltage overhead lines in the main electrical networks of the Republic of Belarus of various rated voltages. Dependences of active power losses due to corona have been constructed and modeled, taking into account different climatic and weather conditions observed in the country. The determination of metrological parameters was based on the analysis of weather data and patterns of types of weather conditions. In order to improve the accuracy of calculating the specific losses of active power due to corona, all possible weather conditions were considered, as well as their combinations. Afterwards, the data on weather conditions were processed and their types were reduced to one of the four existing types of weather. A method for determining electric power losses due to corona in overhead lines based on the average relative air density and geometric parameters of the predominant section of overhead lines has been proposed and presented. It is shown that the usage of exclusively rated voltage can cause errors in determining both the specific and actual values of active power losses for corona.

Keywords: specific losses of active power, weather conditions, corona, electric field strength, power lines, electric power system

For citation: Sekatski D. A., Papkova N. A. (2024) Calculation and Analysis of Specific Losses of Active Power in Overhead Power Lines due to Corona in View of Climatic Data. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (1), 16–32. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-1-16-32> (in Russian)

Введение

Уровень развития электроэнергетической отрасли страны напрямую определяет прогресс развития общества. Чем выше ступень развития общества, тем выше эффективность использования топливно-энергетических ресурсов.

Согласно данным Департамента по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь и отчетным данным ГПО «Белэнерго», величина технологического расхода электроэнергии в энергетической системе Республики Беларусь находится на уровне 8 %. Одной из составляющих этого расхода являются климатические потери в ВЛ 110–750 кВ, выявить которые позволяют различные методики, учитывающие погодные условия. Все методики расчета потерь электроэнергии на корону, применяемые на территории стран СНГ, основаны на данных практических экспериментов, проводимых в СССР

в 1970-е гг. Усредненные значения результатов указанных выше натуральных испытаний положены в основу Положения по нормированию расхода топливно-энергетических ресурсов на предприятиях, в учреждениях и организациях ГПО «Белэнерго» [1]. Согласно этому нормативному документу удельные расходы активной мощности на корону в воздушных линиях (ВЛ), усредненных по конструкции, определяются в зависимости от погодных условий (по данным четырех групп погоды Гидрометеоцентра). С целью автоматизации расчетов удельные потери активной мощности на корону, приведенные в табл. 1, используются программным комплексом DWRES.

Таблица 1

Удельные потери активной мощности на корону ВЛ, усредненные по конструкции фаз
Specific active power losses due to the crown of overhead lines,
averaged over the phase design

Номинальное напряжение, кВ	Удельные потери активной мощности на корону ВЛ, кВт/км, при погоде			
	хорошей	сухом снеге	дожде	изморози
750	4,20	16,55	60,00	122,5
500	2,30	8,80	29,00	76,0
330	0,90	3,90	13,00	28,8
220	0,30	1,10	3,00	12,0
110	0,03	0,12	0,35	1,2

Рассчитать точно величину потерь активной мощности на корону весьма трудно. Существенными причинами этого являются определение и учет параметров воздушных линий электропередачи (геометрические параметры (тип опоры), марка провода, стрела провеса провода, шаг расщепления, давление воздуха) и погодных условий.

Основная часть

Еще в 1912 г. Фрэнк Уильям Пик-младший, исследователь в области электричества сверхвысокого напряжения, заявил, что воздействие снежных осадков сильнее, чем воздействие любых других погодных условий. Натурные испытания на реальных линиях электропередачи в отдельных случаях подтверждали заявление Пика, а иногда нет. В настоящее время предпринято множество попыток найти некоторые количественные связи между атмосферными условиями и потерями активной мощности от короны [2, 3]. Было установлено, что для чистых сухих проводов линий электропередачи потери активной мощности на коронирование в установившихся режимах при частоте могут быть выражены соотношением вида, кВт:

$$P = k(U - U_0), \quad (1)$$

где k – постоянная; U – действующее напряжение между проводом и землей; U_0 – то же, соответствующее началу коронного процесса.

Потери активной мощности на коронирование происходят, если линейное напряжение превышает порог короны. Сама по себе проводящая область недостаточно велика, чтобы вызвать электрический пробой. Коронное напряжение визуального возникновения (видимая корона) больше, чем критическое напряжение короны, поскольку его формирование включает ионизацию и перевод электрона в возбужденное состояние.

Выбор уровня поддержания напряжения на линиях электропередачи определяется рядом причин, среди которых немаловажное значение имеет обоснование пропускной способности ВЛ, устойчивость электрической системы и экономичность возможных режимов работы.

В [4–6] анализируется эффект регулирования рабочего напряжения с целью снижения потерь мощности и энергии в электрических сетях. Для процесса регулирования напряжения с целью минимизирования потерь активной мощности и энергии в электроэнергетической системе необходимо определить потери в активном сопротивлении линии электропередачи, в том числе и от короны, а также выявить зависимость их изменения при изменении напряжения.

Коронный разряд, как известно, может возникнуть в пустотах изолятора, на проводнике или на границе между изолятором и проводником. Когда градиент напряжения превышает значение критического напряжения, молекулы воздуха, окружающие проводники линии электропередачи высокого напряжения, ионизируются (переходная газовая ионизация), что приводит к частичным разрядам.

По формулам Пика [2, 6–8] потери мощности из-за коронного разряда в условиях хорошей погоды можно выразить как:

$$P_{\text{кор.хп}} = \frac{F}{\delta} (f + 25) \sqrt{\frac{R}{d}} \left(\frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} - E_{\text{кр}} \right)^2 L \cdot 10^{-5} \left(\frac{\text{кВт}}{\text{км}} \text{ (на фазу)} \right); \quad (2)$$

$$E_{\text{кор.нач}} = D_{\text{кр}} \delta m_d R \log \left(\frac{d}{R} \right); \quad (3)$$

$$E_{\text{кор.нач}} = D_{\text{кр}} \delta m_v R \log \left(\frac{d}{R} \right) \left(\frac{1 + 0,3}{\sqrt{\delta R}} \right); \quad (4)$$

где F – константа, равная 243; $D_{\text{кр}}$ – критический градиент, для воздуха 21,2 кВ/см; m_d – коэффициент неравномерности для критического напряжения; m_v – коэффициент неравномерности напряжения возникновения видимой короны.

Коэффициент плотности воздуха δ в формулах (1)–(3) принят равным 1 при 25 °С и давлении 760 мм рт. ст. В условиях плохой погоды критическое напряжение $E_{\text{кр}}$ принимается в 0,8 раза выше значения в хорошую погоду.

В качестве примера производился расчет величины потерь активной мощности от коронного разряда для линии напряжением 110 кВ. Полученные по формулам Пика расчетные значения приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Пример расчета потерь активной мощности от коронного разряда по формуле Пика
для линии напряжением 110 кВ**

**The example of calculating active power losses due to a corona discharge
using Pick's formula for 110 kV power line**

Условное обозначение	Параметр	Расчетное значение
F	Фиксированная константа	243
$D_{кр}$	Критический градиент	21,2 кВ/см
m_d	Коэффициент неравномерности для разрушающего критического напряжения	0,85
m_v	Коэффициент неравномерности напряжения возникновения видимой короны	0,72
t	Температура окружающей среды	25 °С
P	Атмосферное давление	760
δ	Плотность воздуха	1
R	Радиус проводника	0,54 см
d	Расстояние между проводниками	300 см
f	Частота	50 Гц
V_L	Линейное напряжение	110 кВ
$E_{кор.нач}$	Критическое напряжение	55,98 кВ
$E_{кор.виз}$	Визуальное напряжение короны	67,71 кВ
L	Длина провода	100 км
$P_{кор.хп}$	Потери активной мощности на корону в хорошую погоду	3,1244 кВт
$P_{кор.пл.пог}$	Потери активной мощности на корону при плохой погоде	158,3 кВт

Если отношение фазного напряжения к критическому напряжению пробоя меньше значения 1,8, то для определения потерь активной мощности на коронный разряд используется формула Петерсона [3]

$$P_{кор.хп \text{ Петерсона}} = \frac{21 \cdot 10^{-6} f V^2 F}{\left(\log_{10} \left(\frac{D}{r} \right) \right)^2}. \quad (5)$$

Графическое сравнение видимого коронного разряда критического напряжения и визуального начального напряжения короны в зависимости от различных значений радиуса проводника показано на рис. 1. Радиус проводника прямо пропорционален как визуальному коронному напряжению, так и критическому значению напряжения.

На рис. 1 видно, что при увеличении радиуса проводника величины визуального и критического напряжений также повышаются.

Графическая зависимость величины потерь активной мощности на корону при хорошей погоде в зависимости от расстояния между проводниками показана на рис. 2. Если расстояние сделать достаточно большим, то потери активной мощности на коронный разряд могут практически отсутствовать, что требует дополнительного технико-экономического обоснования.

Использование усредненных значений удельных потерь на корону по номинальному напряжению не всегда эффективно отражает расчетную ве-

личину, поскольку они зависят от большого числа факторов. На рис. 3 показано, что повышение напряжения также увеличивает потери активной мощности на корону.

Рис. 1. Напряжение короны при различных радиусах проводника
Fig. 1. Corona voltage at different values of conductor radius

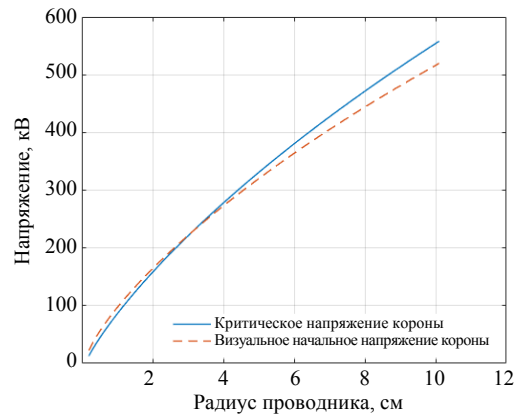


Рис. 2. Потери активной мощности на корону при различных расстояниях между проводниками
Fig. 2. Active power losses due to corona at different distances between conductors

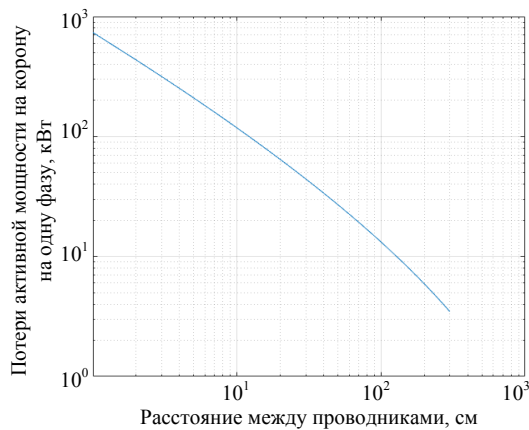
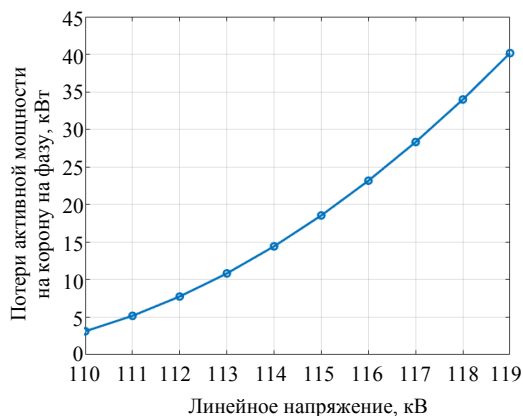


Рис. 3. Зависимость потерь активной мощности на корону от линейного напряжения
Fig. 3. Dependence of active power losses to corona on line voltage



Выражение (3) показывает, что потери активной мощности на коронный разряд прямо пропорциональны квадратному корню из размера проводника. Графическая зависимость, приведенная на рис. 4, показывает, что увеличение диаметра проводника приводит к соответствующему повышению потерь активной мощности на корону.

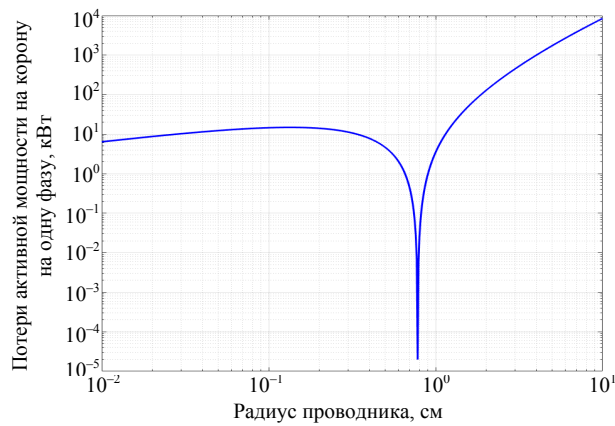


Рис. 4. Потери активной мощности в зависимости от радиуса проводника

Fig. 4. Active power losses depending on the radius of the conductor

В штормовых или плохих атмосферных погодных условиях, таких как снег, дожди и изморозь, снижается критическое напряжение и усиливается эффект короны. На рис. 5 показан график потерь активной мощности на корону как в плохую, так и в ясную погоду при различных значениях критических напряжений пробоя. Результаты свидетельствуют о том, что чем ниже значение критического напряжения пробоя, тем выше потери мощности вследствие коронного разряда.

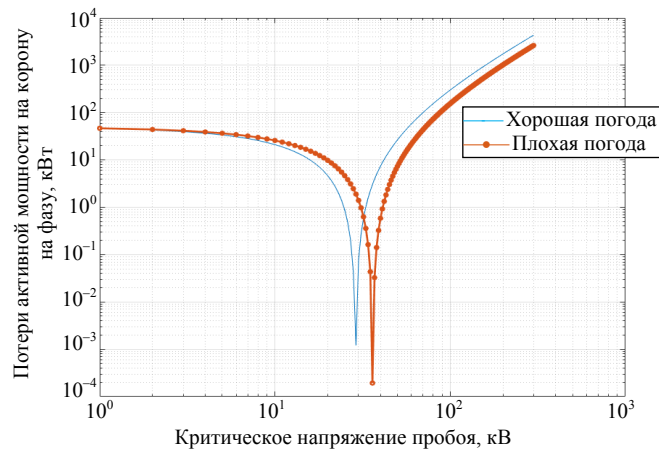


Рис. 5. Потери активной мощности в зависимости от критического напряжения

Fig. 5. Active power losses depending on the critical voltage

В настоящее время в Европейском союзе активно используется программный комплекс FACE (Field and Corona Effects), который применяется для определения общих эффектов коронного разряда и поля высоковольтных линий электропередачи переменного, постоянного или переменного/постоянного тока (рис. 6).

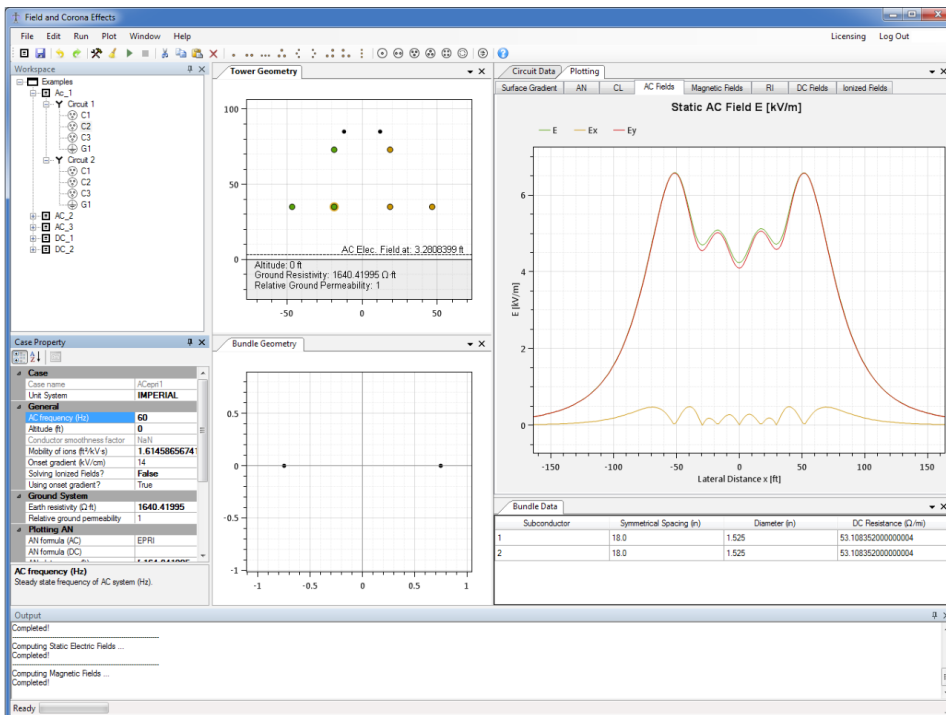


Рис. 6. Интерфейс программного комплекса FACE (Field and Corona Effects)

Fig. 6. Interface of the FACE (Field and Corona Effects) software package

Программный комплекс способен определить потери активной мощности на коронирование, уровни слышимых шумов, радиопомех, количественные характеристики магнитных, статических и ионизированных электрических полей. В качестве математического аппарата программного обеспечения используются формулы Пика (1)–(3) и Петерсона (5), однако по заявлениям разработчиков [9] при расчетах программный комплекс учитывает только два типа погоды: плохая и хорошая. При этом для моделирования плохих погодных условий разработчики завышают показатель критического напряжения $E_{кп}$ в 0,8 раза выше значения в хорошую погоду, не учитывая разнообразия типов погодных условий, присутствующих в реальных условиях эксплуатации линий электропередачи.

В связи с этим авторами статьи был реализован подход, учитывающий все разнообразие климатических условий Республики Беларусь, и проведен расчет удельных потерь активной мощности на корону для воздушных линий электропередачи напряжением 110–750 кВ по методике [11]. Это позволило в рамках выполнения ХД 3543-22 использовать предоставленные ГПО «Белэнерго» типы используемых опор (списочно), марки проводов, шаг расщепления проводов ВЛ и другую необходимую информацию.

В соответствии с выбранной методикой составлена математическая модель и проведена серия расчетов удельных потерь активной мощности на

корону. Алгоритм автоматизирован в программном комплексе Mathcad. Результаты расчетов для всех исходных данных приведены в виде файлов таблиц Microsoft Excel, пример работы с которыми приведен на рис. 7. Расчетные файлы содержат данные и значения удельных потерь активной мощности на корону для четырех типов погоды на различных проводах ВЛ 110–750 кВ.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I
	ТИП ОПОРЫ	МАРКА	СТРЕЛА	Дельта	Хорош	Сухой	Дождь	Изморозь	
4			1	0,442	1,985	7,281	26,193		
4			1	0,459	2,076	7,583	27,149		
4			1	0,487	2,235	8,098	28,752		
4			1	0,508	2,353	8,48	29,939		
4			1	0,525	2,453	8,792	30,877		
4			1	0,53	2,482	8,884	31,156		
4			1	0,533	2,498	8,935	31,313		
4			1	0,536	2,518	8,995	31,487		
4			1	0,537	2,52	8,988	31,388		
4			1	0,544	2,561	9,126	31,864		
4			1	0,834	4,139	13,779	44,069		
4			1	0,864	4,336	14,429	46,168		
4			1	0,903	4,544	15,028	47,67		
4			1	0,942	4,752	15,625	49,093		
4			1	0,963	4,849	15,881	49,571		
4			1	0,98	4,945	16,162	50,373		
4			1	0,982	4,948	16,153	50,159		
4			1	0,992	5,001	16,309	50,554		
4			1	1,009	5,092	16,57	51,213		
4			1	1,012	5,112	16,636	51,444		
4			1	1,017	5,117	16,572	51,061		
4			1	1,025	5,185	16,855	52,02		
4			1	1,028	5,194	16,866	51,97		

Рис. 7. Пример работы с результатами расчета для ВЛ 330 кВ

Fig. 7. An example of the work using calculation results for 330 kV overhead power lines

Последовательно выбрав тип опоры, марку провода (для линий 330 и 220 кВ), стрелу провеса (0–20 м, если позволяют допустимые расстояния до земли) и плотность воздуха (0,95–1,2 с шагом 0,005), можно получить расчетные величины удельных потерь активной мощности на корону для четырех видов погодных условий [12].

Анализ результатов расчета указывает на то, что удельные потери активной мощности на корону зависят от множества факторов. Среди них можно выделить группу следующих наиболее важных факторов: геометрические параметры (тип опоры), марку провода, стрелу провеса провода, шаг расщепления, температуру окружающей среды и атмосферное давление.

Так, с целью оценки влияния потерь на корону ВЛ 110 кВ проведены расчеты для типовых опор П110-1, ПБ110-1, ПБ110-3, ПБ110-5 соответственно для проводов марок АС-70, АС-95, АС-120, АС-150, АС-240.

В действующей в настоящее время в Республике Беларусь инструкции [1] на предприятиях, в учреждениях и организациях ГПО «Белэнерго» величина относительной плотности воздуха в расчете потерь активной мощности на корону не учитывается [1]. В рамках выполнения настоящей

работы были проведены исследования влияния указанной величины на удельные потери активной мощности на корону для конкретных типов опор ВЛ. В табл. 3 приведены результаты расчетов потерь на корону по маркам провода для всего диапазона изменения стрел провеса и относительной плотности воздуха.

Таблица 3

Результаты расчетов потерь на корону по маркам провода
Calculation results of active power losses due to corona by wire brand

Марка провода	Диапазон изменения удельных потерь мощности на корону, кВт/км, при погоде			
	хорошей	сухом снеге	дожде	изморози
АС-70	0,022–0,080	0,088–0,393	0,311–1,345	1,250–4,487
АС-95	0,022–0,057	0,094–0,243	0,270–0,915	1,160–3,388
АС-120	0,027–0,047	0,117–0,183	0,329–0,675	1,422–2,652
АС-150	0,038	0,157	0,474–0,476	2,010–2,015
АС-240	–	–	–	–

В табл. 4 приведены диапазоны изменения удельных потерь мощности на корону лишь для тех случаев, когда они значительны. Так, для провода марки АС-240 величину удельных потерь мощности на корону вследствие большого радиуса проводника можно не учитывать.

Таблица 4

Сочетания типов опор с марками проводов, при которых возникают потери активной мощности на корону
Combination of pole types and wire brands at which active losses due to corona occur

Тип опоры	Марки проводов
П110-1	АС-70, АС-95, АС-120
ПБ110-1	АС-70, АС-95, АС-120, АС-150
ПБ110-3	АС-70, АС-95, АС-120, АС-150
ПБ110-5	АС-70, АС-95, АС-120

При строительстве ВЛ, как правило, применяются типовые опоры, характеристики которых приведены в соответствующих альбомах. Некоторые типы опор с указанием применяемых проводов приведены в табл. 4. Сочетание указанных опор ВЛ и проводов приводит к возникновению потерь активной мощности на корону.

Помимо геометрических параметров ВЛ, определяющими факторами, влияющими на потери активной мощности на корону, являются продолжительность и вид погодных условий. Использование архивных погодных данных, их прогнозирование [12, 13] возможно также для анализа климатической составляющей потерь активной мощности [14–16].

Основными видами погоды, используемыми в настоящее время при расчете потерь активной мощности на корону, являются:

«1) хорошая погода – это погода с относительной влажностью воздуха менее 90 %, без осадков, тумана и отложений росы, инея, изморози и гололеда на проводах;

2) сухой снег, к которому относятся также снежная крупа, снежные зерна, ледяные иглы в воздухе, метели с выпадением снега (за исключением низовой метели и поземок, которые не достигают проводов);

3) дождь – дожди разной интенсивности, в том числе морось и мокрый снег, так как их влияние на уровень потерь на коронирование близко к влиянию дождя;

4) изморозь, приводящая к гололедно-изморозевым отложениям на проводах. Сюда также относятся кристаллическая и зернистая изморозь, гололед, сложные отложения на проводах» [17].

В реальных климатических условиях, согласно данным Гидрометеоцентра, погодные условия не ограничиваются указанными четырьмя видами. Проведенный анализ архивных погодных данных позволил выделить гораздо большее количество видов и сочетаний погодных условий, которые в совокупности с возможностью их прогнозирования [18] позволяют выделить гораздо большее количество видов погоды и их сочетаний.

В соответствии с п. 74 Инструкции по расчету и обоснованию нормативов расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям [1], продолжительность каждой группы погодных условий в зоне ВЛ за расчетный период необходимо принимать на основании данных Гидрометеоцентра. Эти данные вносятся в программный комплекс по расчету потерь. Окно ввода числа часов погодных данных приведено на рис. 8.

Число часов в текущем расчётном периоде, ч				
<input type="text"/>	соответствующее 2-й группе погоды (хорошая погода с влажностью 90% и более, дождь, мокрый снег, роса)			
<input type="text"/>	соответствующее 3-й группе погоды (туман)			
<input type="text"/>	хорошей погоде	<input type="text"/>	сухому снегу	<input type="text"/>
			дождю	<input type="text"/>
				изморози

Рис. 8. Пример окна ввода числа часов погодных данных

Fig. 8. An example of the input window for the number of hours of weather data

Сбор данных осуществлялся по 3-часовым интервалам о типе погодных данных за период 2005–2022 гг. по следующим метеостанциям, приведенным на рис. 9: Верхнедвинск, Утена (Литва), Шарковщина, Лынтупы, Полоцк, Докшицы, Лепель, Витебск (аэропорт), Сенно, Вильнюс (Литва), Орша, Борисов, Горки, Смоленск (Россия), Лида, Уручье (Минск), Марьяна Горка, Кличев, Славгород, Костюковичи, Барановичи, Слуцк, Бобруйск, Жлобин, Пинск, Житковичи, Мозырь, Василевичи, Гомель, Брагин, Чернигов (Украина), Березино.

В процессе анализа погодных данных выявлено более 1400 видов погоды (в том числе сочетаний), которые приводились к одному из восьми типов. Для каждого из восьми типов рассчитывали вероятность возникновения видов погоды по месяцам, после чего брали среднегодовое значение суммарной вероятности, которая затем использовалась для определения типа погоды. Данные о плотности воздуха рассчитывались на основе статистических данных конкретной метеорологической станции об атмосферном давлении и температуре воздуха.

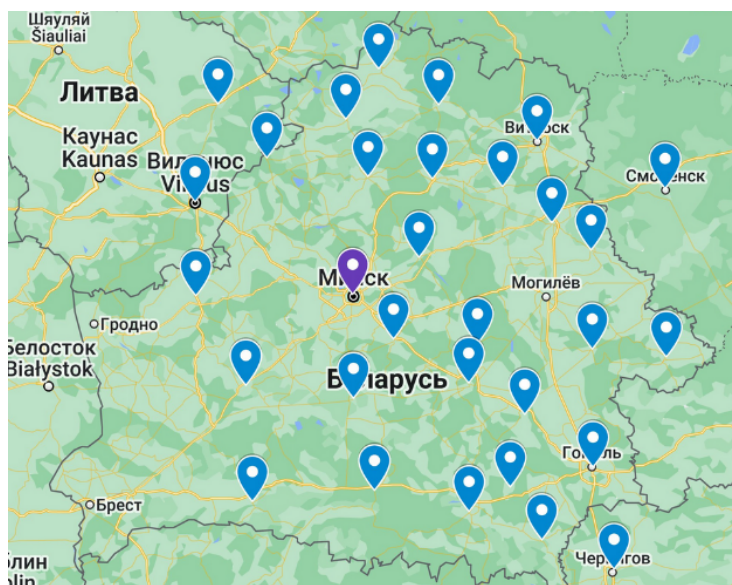


Рис. 9. Карта автоматизированных метеорологических станций

Fig. 9. The map automated weather stations

Для расчета вероятности возникновения погоды можно определить вероятность возникновения погоды за каждый месяц или учитывая ее как среднегодовую. Пример результатов расчета вероятности возникновения конкретных погодных условий приведен в табл. 5 (для станции Березино).

Чтобы определить значение потерь активной мощности на корону, необходимо сложить соответствующие группы вероятностей Ψ для метеостанции и умножить их на расчетные значения удельных потерь при соответствующем значении плотности воздуха.

Приведем расчет для среднегодового значения $\delta = 1,040$ для провода марки 2хАС-300. Вероятность возникновения погодных условий в среднем за год приведена в последней строке табл. 5.

Тогда при работе ВЛ в течение года удельные потери активной мощности на корону составят 42845,22 кВт/км. Полученная величина отличается от значения, рассчитанного по действующей инструкции, на 29,4 % для линии номинальным напряжением 330 кВ.

При расчете суммарных потерь электроэнергии на корону необходимо правильно учитывать:

- продолжительность группы погоды по времени;
- потери мощности на корону для соответствующей группы погоды.

Для проведения сравнительного анализа результатов расчета потерь мощности на корону дополнительно апробированы следующие методики с учетом [13]:

- усредненных по конструкции фаз потерь мощности на корону по действующей инструкции [1];
- точных потерь мощности на корону по методике, рассчитывая удельные потери активной мощности на каждой опоре ВЛ [12].

Таблица 5

Значения вероятности Ψ возникновения погодных условий
Probability Ψ of occurrence of weather conditions

Месяц	Среднее значение вероятности возникновения погодных условий										Среднее значение плотности воздуха
	Хорошая погода	Дождь	Мокрый снег	Сухой снег	Зернистая изморозь	Кристаллическая изморозь	Туман	Повышенная влажность воздуха в хорошую погоду			
Январь	0,344691598	0,136832339	0,035172966	0,15295	0,012593	0,005008	0,060045104	0,252705886	1,088718818		
Февраль	0,424304544	0,117869132	0,030533217	0,14998	0,004235	0,001588	0,072004574	0,199482303	1,088268931		
Март	0,584519398	0,120198909	0,028350085	0,06901	0,001188	0	0,041012683	0,155723012	1,062735533		
Апрель	0,715611036	0,144860933	0,01131662	0,00273	0	0	0,020841853	0,104643701	1,03587887		
Май	0,620071354	0,205612641	0,005524507	0,00024	0	0	0,025043769	0,143510537	1,016993749		
Июнь	0,653588762	0,159336169	0,008419891	0,00025	0	0	0,020313425	0,158096655	1,000974138		
Июль	0,575325657	0,176055221	0,011207678	0	0	0	0,040667132	0,196744313	0,995019516		
Август	0,591224898	0,156336562	0,005074243	0	0	0	0,054222058	0,19314224	1,000887995		
Сентябрь	0,525798841	0,153986632	0,001309058	0,00074	0	0	0,072807436	0,245361713	1,021486429		
Октябрь	0,45261223	0,159820631	0,002143462	0,00629	0	0	0,083913713	0,295222458	1,045522041		
Ноябрь	0,319293404	0,178725709	0,010840889	0,04155	0,005225	0	0,167726352	0,276641873	1,060724064		
Декабрь	0,282170946	0,167817654	0,026078282	0,1209	0,014071	0,000975	0,095670699	0,292317316	1,074957152		
Среднее за год	0,508236078	0,156551038	0,014563213	0,04486	0,003063	0,000609	0,062869579	0,209252996	1,04097599		

В свою очередь, их можно учитывать в соответствии со следующими подходами (учет геометрии ВЛ):

- учет потерь мощности для каждого эквивалентного участка;
- учет потерь мощности для преобладающего по суммарной длине участка ВЛ, принятого на всей длине ВЛ.

При определении потерь мощности на корону значимым фактором также является выбор методики учета относительной плотности воздуха, которую для расчета можно определить по следующим параметрам:

- учет фактической относительной плотности воздуха для каждого конкретного месяца года;
- учет среднестатистической относительной плотности воздуха за все время по результатам анализа статистических данных периода метеонаблюдений.

При учете продолжительности погоды по времени можно также пользоваться такими различными методиками, как:

- учет продолжительности погоды по времени по действующей методике;
- учет продолжительности погоды по времени по фактическим часам для соответствующих групп для каждого конкретного месяца года;
- учет среднестатистических продолжительностей погоды по времени за все время по результатам анализа статистических данных всего периода метеонаблюдений.

ВЫВОДЫ

1. Рассмотрена задача определения удельных потерь активной мощности на корону в воздушных линиях электропередачи основных электрических сетей Республики Беларусь и влияние их конструктивных особенностей и параметров. Доказано, что для более точного расчета удельных потерь мощности на корону необходимо учитывать следующие факторы: тип опоры, марку провода, стрелу провеса провода, междуфазное расстояние между проводами ВЛ, виды погоды и плотность воздуха. Это позволит уйти от средних удельных значений (в соответствии с методикой из действующей инструкции) потерь активной мощности на корону и перейти к более точным значениям.

2. Проанализированы все виды погодных условий, характерных для территории страны. Полученные данные преобразованы и приведены к форме, пригодной для использования в качестве вероятностных показателей при расчетах удельных потерь активной мощности на корону. Учет часов погоды предлагается вести по данным автоматизированных метеорологических станций и по данным датчиков погоды, предоставляемых ежемесячно. Анализ погоды по данным метеорологических станций не всегда показывает повторяемость погодных условий по годам, что

не позволяет корректно использовать усредненные показатели за все время наблюдений.

3. Развита методы и алгоритмы расчета потерь активной мощности на коронирование для прогнозирования и нормирования потерь электроэнергии по схемно-техническим и расчетным данным.

4. Анализ результатов расчета удельных потерь активной мощности на корону показывает, что их учет на ВЛ 110 кВ также необходимо производить по уточненным параметрам. Для некоторых параметров ВЛ (например, для марки провода АС-240) их можно не учитывать.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об утверждении Положения по нормированию расхода топливно-энергетических ресурсов на предприятиях, в учреждениях и организациях государственного производственного объединения «Белэнерго», Инструкции по расчету и обоснованию нормативов расхода электроэнергии на ее передачу по электрическим сетям [Электронный ресурс]: постановление Министерства энергетики Республики Беларусь от 16.12.2013 № 48 (в ред. пост. от 05.07.2017 № 23). Режим доступа: <https://energodoc.by/document/view?id=3068>.
2. Peek, F. W. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering / F. W. Peek. New York, NY, USA: McGraw-Hill Book Company, 1920.
3. HVDC Corona Current Characteristics and Audible Noise During Wet Weather Transitions / S. Hedtke [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. 2020. Vol. 35, No 2. P. 1038–1047. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2019.2936285>.
4. Anguan, W. Line loss prediction and loss reduction plan for power grids / W. Anguan, N. Baoshan. John Wiley & Sons, Ltd, 2016. 361 p. <https://doi.org/10.1002/9781118867273.ch13>.
5. Кононов, Ю. Г. Методы определения потерь мощности и энергии на корону в действующих ВЛ / Ю. Г. Кононов, В. А. Костюшко О. С. Рыбасова // Энергия единой сети. 2017. № 6 (35). С. 22–40.
6. Костюшко, В. А. Расчет потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока / В. А. Костюшко // Энергия единой сети. 2016. № 3 (26). С. 40–47.
7. Maruvada, P. S. Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines / P. S. Maruvada. Baldock, UK: Research Studies Press, 2000. 310 p.
8. Kononov, Y. The Reactive Corona Effect Investigation Based on PMU Measurements in a Real 500 kV TL / Y. Kononov, A. Diachenko // 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET), Prague, Czech Republic, 2022. P. 1–3, doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872716.
9. Matthews, J. C. The effect of weather on corona ion emission from AC high voltage power lines / J. C. Matthews // Atmospheric Research. 2012. Vol. 113. P. 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.03.016>.
10. Li, Q. Calculating the Surface Potential Gradient of Overhead Line Conductors / Q. Li, S. M. Rowland, R. Shuttleworth // IEEE Transactions on Power Delivery. 2015. Vol. 30, No 1. P. 43–52. <https://doi.org/10.1109/tpwrd.2014.2325597>.
11. Fied and Corona Effect [Electronic Resource]. Mode of access: <https://www.pscad.com/software/face/overview>. Date of access: 19.11.2023.
12. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1150 кВ. М.: СЦНТИ, 1975.
13. Sekatski, D. A. Comparative Analysis of Active Power Losses Per Corona of 330 kV Overhead Lines / D. A. Sekatski, A. I. Khalyasmaa, N. A. Papkova // 2023 Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference (BUSSEC). Ekaterinburg, 2023. P. 24–27. <https://doi.org/10.1109/bussec59406.2023.10296425>.

14. Оперативное прогнозирование скорости ветра для автономной энергетической установки тяговой железнодорожной подстанции / П. В. Матренин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. 66, № 1. С. 18–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29>.
 15. Расписание погоды [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tr5.by/> Дата доступа: 19.11.2023.
 16. Секацкий, Д. А. Учет атмосферной составляющей в задаче расчета потерь мощности и электроэнергии в линиях электропередачи на примере годовых погодных данных Минска / Д. А. Секацкий // Энергия и Менеджмент. 2016. № 5. С. 25–29.
 17. Баламетов, А. Б. Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса / А. Б. Баламетов, Э. Д. Халилов // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. Т. 63, № 1. С. 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.
 18. Костюшко, В. А. Анализ расчетных и экспериментальных оценок потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередач переменного тока / В. А. Костюшко. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011. 84 с.
 19. Повышение точности прогнозирования генерации фотоэлектрических станций на основе алгоритмов k -средних и k -ближайших соседей / П. В. Матренин [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321>.
- Поступила 16.08.2023 Подписана в печать 20.10.2023 Опубликована онлайн 31.01.2024

REFERENCES

1. *On Approval of the Regulations on Rationing the Consumption of Fuel and Energy Resources at Enterprises, Institutions and Organizations of the "Belenergo" State Production Association, Instructions on Calculation and Justification of Norms for Electricity Consumption for its Transmission through Electrical Networks*. Resolution of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus of December 16, 2013 No. 48 (As Amended by Resolution of July 5, 2017 No 23). Available at: <https://energodoc.by/document/view?id=3068> (in Russian).
2. Peek F. W. (1920) *Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering*. New York, McGraw-Hill Book Company.
3. Hedtke S., Xu P., Pfeiffer M. D., Zhang B., He J., Franck Ch. (2020) HVDC Corona Current Characteristics and Audible Noise During Wet Weather Transitions. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 35 (2), 1038–1047. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2019.2936285>.
4. Anguan W., Baoshan N. (2016) *Line Loss Prediction and Loss Reduction Plan for Power Grids*. John Wiley & Sons, Ltd. 361 p. <https://doi.org/10.1002/9781118867273.ch13>.
5. Kononov U. G., Kostyushko V. A., Rybasova O. S. (2017) Estimation of the Power Loss due to Corona in the Active Highlights. *Energiya edinoi seti = Energy of Unified Grid*, (6), 22–40 (in Russian).
6. Kostyushko V. A. (2016) Alternate Current Overhead Grid Corona Power Losses Calculations, *Energiya Edinoi Seti = Energy of Unified Grid*, (3), 40–47 (in Russian).
7. Maruvad, P. S. (2000) *Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines*. Baldock, UK: Research Studies Press.
8. Kononov Y., Diachenko A. (2022) The Reactive Corona Effect Investigation Based on PMU Measurements in a Real 500 kV TL. *2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)*. Prague, Czech Republic, 1–3. doi: 10.1109/ICECET55527.2022.9872716.
9. Matthews J. C. (2012) The Effect of Weather on Corona Ion Emission from AC High Voltage Power Lines. *Atmospheric Research*, 113, 68–79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.03.016>.

10. Li Q., Rowland S. M., Shuttleworth R. (2015) Calculating the Surface Potential Gradient of Overhead Line Conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30 (1), 43–52. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2014.2325597>.
11. *Filed and Corona Effect*. Available at: <https://www.pscad.com/software/face/overview> (accessed 19 November 2023).
12. *Guidelines for Accounting for Corona Losses and Corona Interference in the Selection of AC 330–750 kV and DC 800–1150 kV Overhead Power Line Wires*. Moscow, 1975 (in Russian).
13. Sekatski D. A., Khalyasmaa A. I., Papkova N. A. (2023) Comparative Analysis of Active Power Losses Per Corona of 330 kV Overhead Lines. *2023 Belarusian-Ural-Siberian Smart Energy Conference (BUSSEC)*. Ekaterinburg, 24–27. <https://doi.org/10.1109/bussec59406.2023.10296425>.
14. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Rusina A. G., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A. (2023) Operational Forecasting of Wind Speed for a Self-Contained Power Assembly of a Traction Substation. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (1), 18–29. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-18-29> (in Russian).
15. *Reliable Prognosis*. Available at: <https://rp5.by> (accessed 19 November 2023) (in Russian).
16. Sekatski D. A. (2016) Consideration of the Atmospheric Component in the Problem of Calculating Power and Electricity Losses in Power Transmission Lines Using the Example of Annual Weather Data in Minsk. *Energiya i Menedzhment [Energy and Management]*, (5), 25–29 (in Russian).
17. Balametov A. B., Halilov E. D. (2020) Simulation of Electric Networks Modes Using Steady-State and Heat Balance Equations. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 63 (1), 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80> (in Russian).
18. Kostyushko V. A. (2011) *Analysis of Calculated and Experimental Estimates of Power Losses on Overhead AC Power Lines due to Corona*. Moscow, Energoprogress Publ. 84 (in Russian).
19. Matrenin P. V., Khalyasmaa A. I., Gamaley V. V., Eroshenko S. A., Papkova N. A., Sekatski D. A., Potachits Y. V. (2023) Improving of the Generation Accuracy Forecasting of Photovoltaic Plants Based on k -Means and k -Nearest Neighbors Algorithms. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*; 66 (4), 305–321. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-305-321> (in Russian).