

УДК 621.317.384:621.315.1(575.2)(23.03)
DOI: 10.36979/1694-500X-2025-25-8-30-38

**УЧЕТ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ ОТ КОРОННОГО РАЗРЯДА
ПРИ ВЫБОРЕ ПРОВОДОВ И КОНСТРУКЦИЙ ФАЗ ГОРНЫХ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НАПРЯЖЕНИЕМ 220–500 кВ
В ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ КЫРГЫЗСТАНА**

Ш.Б. Дикамбаев, Ю.П. Симаков, О.А. Подрезов

Аннотация. Приведен сокращенный вариант рамочной уточненной методики расчета среднегодовых потерь мощности от короны на горных воздушных линиях электропередачи. Отмечено, что в Кыргызской энергосистеме большая часть линий 220–500 кВ проходят в сложных высокогорных районах, характеризующихся экстремальными природно-климатическими условиями, в связи с чем к ним предъявляются повышенные требования к надежности по сравнению с линиями, проходящими в равнинных условиях. Выбор сечения проводов и конструкции фазы для воздушных линий электропередачи напряжением 110 кВ и выше в значительной мере определяется условиями ограничения коронного разряда. Одной из составляющих потерь в воздушных линиях электропередачи являются потери, вызванные коронным разрядом, которые особенно ощутимы на проводах горных линий напряжением 220–500 кВ, достигающие нескольких десятков киловатт на один километр линии, обусловленные геофизическими и климатическими условиями высокогорья.

Ключевые слова: условия высокогорья; линии электропередачи; провода воздушных линий; коронный разряд; потери мощности от короны; природно-климатические условия; относительная плотность воздуха; погодные условия; эмпирические формулы.

**КЫРГЫЗСТАНДЫН ЖАРАТЫЛЫШ-КЛИМАТТЫК ШАРТТАРЫНДА
220-500 кВ ЧЫҢАЛУУДАГЫ ЭЛЕКТР БЕРҮҮЧҮ
ТОО ЛИНИЯЛАРЫНЫН ФАЗАЛАРЫНЫН ӨТКӨРГҮЧТӨРҮН
ЖАНА КОНСТРУКЦИЯЛАРЫН ТАНДООДО КОРОНАЛЫК РАЗРЯДДЫН
КУБАТТУУЛУГУН ЖОГОТУУНУ ЭСЕПКЕ АЛУУ**

Ш.Б. Дикамбаев, Ю.П. Симаков, О.А. Подрезов

Аннотация. Бул макалада тоодогу аба электр чубалгыларында таажыдан орточо жылдык кубаттуулуктун жоготууларын эсептөөнүн такталган алкактык методологиясынын кыскартылган версиясы келтирилген. Белгиленгендей, Кыргызстандын энергетика системасында 220–500 кВ чубалгыларынын басымдуу бөлүгү экстремалдык табигый-климаттык шарттар менен мүнөздөлгөн татаал бийик тоолуу райондордо өтөт, ошондуктан алар түздүктөгү шарттарда өткөн линияларга салыштырмалуу ишенимдүүлүккө жогорулатылган талаптарга дуушар болушат. 110 кВ жана андан жогору чыңалуудагы аба электр чубалгылары үчүн зымдардын кесилишин жана фазалык конструкциясын тандоо негизинен таажы разрядын чектөө шарттары менен аныкталат. Аба электр чубалгыларындагы жоготуулардын компоненттеринин бири болуп таажы разрядынан келип чыккан жоготуулар саналат, алар өзгөчө 220–500 кВ чыңалуудагы тоо чубалгыларынын зымдарында байкалат, бийик тоолордун геофизикалык жана климаттык шарттарынан улам линиянын бир километринде бир нече ондогон киловаттга жетет.

Түйүндүү сөздөр: бийик тоолуу шарттар; электр линиялары; аба чубалгыларынын зымдары; таажы разряды; таажыдан электр энергиясын жоготуу; табигый-климаттык шарттар; салыштырмалуу аба тыгыздыгы; аба ырайынын шарттары; эмпирикалык формулалар.

**ACCOUNTING OF POWER LOSSES FROM CORONA DISCHARGE
WHEN SELECTING WIRES AND PHASE STRUCTURES
OF MOUNTAIN POWER TRANSMISSION LINES WITH VOLTAGE OF 220–500 kV
IN NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS OF KYRGYZSTAN**

Sh.B. Dikambaev, Yu.P. Simakov, O.A. Podrezov

Abstract. The choice of wire cross section and phase design for overhead power lines of 110 kV and above is largely determined by the corona restriction conditions. In the Kyrgyz power system, most of the 220–500 kV lines pass in difficult highlands characterized by extreme natural and climatic conditions, and therefore they have increased reliability requirements compared to lines passing in flat conditions. One of the components of losses in overhead power transmission lines is losses caused by corona discharge, which are especially noticeable on wires of mountain lines with a voltage of 220–500 kV, reaching several tens of kilowatts per kilometer of line, due to geophysical and climatic conditions of the highlands. The article provides an abbreviated framework version of the updated methodology for calculating the average annual power losses from the corona on mountain overhead power lines.

Keywords: highland conditions; transmission lines; overhead line wires; corona discharge; power losses from corona; natural and climatic conditions; relative air density; weather conditions; empirical formulas.

Кыргызская Республика обладает достаточным потенциалом энергетических ресурсов и имеются все необходимые предпосылки для успешного развития энергетической отрасли.

Основной составляющей энергетической отрасли является электроэнергетический сектор (ЭЭС), который оказывает определяющее влияние на состояние и перспективы развития национальной экономики.

В настоящее время ЭЭС в целом обеспечивает потребность страны в электроэнергии. Однако в последние годы в результате быстрого роста потребления электроэнергии энергосистема работает на пределе своих возможностей, особенно в осенне-зимний период, когда потребление мощности в отдельные сутки превышает 90 % располагаемой мощности электростанций, т. е. все резервы практически исчерпаны. В таких ситуациях возникает необходимость импортирования электроэнергии из соседних государств.

Общеизвестно, что для успешного развития экономики любой страны необходимым условием является устойчивое и опережающее развитие энергетической отрасли. В первую очередь это предполагает наличие необходимых резервов генерирующих мощностей порядка 20–30 % от потребляемой мощности, которых в нашей стране на сегодняшний день не имеется.

Учитывая создавшуюся ситуацию, руководством страны предпринимаются необходимые усилия для успешного развития энергетической отрасли. В стратегических документах по устойчивому развитию энергетики страны до 2030 года предусмотрено строительство новых, в первую очередь Камбаратинской ГЭС-1, и в перспективе ряда гидроэлектростанций в бассейнах рек Нарын, Сары-Джаз и других. Кроме строительства новых электростанций, намечена реконструкция и модернизация существующих гидроэлектростанций с увеличением их мощности.

Реализация стратегических планов развития энергетической отрасли позволит почти в два раза увеличить совокупную установленную мощность электростанций страны. При этом предполагается строительство новых и развитие существующих магистральных и межсистемных линий электропередачи (ЛЭП) сверхвысокого напряжения (СВН). В нашей энергосистеме такими линиями являются ЛЭП напряжением 220–500 кВ, по которым осуществляется транспорт электроэнергии от генерирующих источников во все районы ее потребления, а также на экспортные поставки. Большая часть таких линий проложена в сложных высокогорных районах, характеризующихся экстремальными природно-климатическими условиями, которые оказывают отрицательное, а в некоторых случаях, даже катастрофическое воздействие на работу воздушных линий электропередачи и других энергообъектов. В этой связи к горным ЛЭП должны предъявляться повышенные требования к надежности по сравнению с линиями, проходящими в равнинных условиях.

Надежность горных электропередач должна закладываться на стадии проектирования, обеспечиваться в процессе строительства и монтажа, а также поддерживаться в период их эксплуатации высокопрофессиональным обслуживанием.

В существующей практике проектирования ВЛ, сооружаемых в горных районах, методика выбора электрической части во многом схожа с методикой, используемой при проектировании равнинных линий. Однако последние результаты наших исследований о характере влияния особенностей горных регионов на работу воздушных линий электропередачи и других энергообъектов, свидетельствуют о том, что при проектировании и строительстве энергообъектов, расположенных в горных условиях, действующие нормативно-технические и руководящие документы не всегда учитывают суровые природно-климатические условия высокогорных районов. В результате, как показывает опыт строительства и эксплуатации горных ВЛ, это зачастую приводит к неоправданному увеличению затрат на их сооружение, а в отдельных случаях и к снижению их надежности и авариям.

Поэтому повышение надежности горных ВЛ СВН, а также снижение стоимости их строительства и эксплуатации зависит от правильного и наиболее полного учета особенностей природно-климатических условий горных районов. Основой выбора параметров основных элементов горных линий электропередачи должны служить результаты научных исследований и технико-экономических расчетов, позволяющих отыскать оптимальные решения, обеспечивающие их высокую надежность.

В этой связи, выбор основных параметров и конструктивных элементов горной воздушной линии электропередачи СВН представляет собой комплексную техническую и экономическую задачу, от решения которой в значительной мере зависит экономичность и надежность электропередачи.

Одним из основных и важнейших элементов ЛЭП являются провода, так как они в значительной мере определяют экономические показатели электропередачи. С технической стороны, от сечения проводов и конструкций фаз зависит расчет механических нагрузок, определяющих выбор опор и гирлянд изоляторов. Поэтому стоимость электропередачи СВН во многом зависит от конструкции фаз и проводов ВЛ.

Выбор сечения проводов и конструкции фазы ВЛ в значительной мере определяется условиями ограничения коронного разряда, так как коронный разряд на проводах приводит к дополнительным потерям электроэнергии, составляя около 20 % от общих технических потерь. Он также является основным источником радиопомех и помех для высокочастотных каналов связи. Например, в условиях нашей республики для ВЛ, проходящих в горных условиях на отметках выше 1000 м н.у.м., этот показатель может иметь более высокие значения из-за влияния сложных климатических условий высокогорья. По результатам исследований [1–3] потери от короны на горной ВЛ СВН могут в 2–3 раза превышать потери на подобной равнинной линии, достигая при определенных условиях сотен киловатт на один километр линии. В связи с этим, при выборе оптимальной конструкции проводов и фазы горной ВЛ, необходимым условием является оценка потерь мощности от короны. Поэтому, технико-экономическое обоснование электропередачи должно включать в себя расчеты среднегодовых потерь мощности от короны на проектируемой ВЛ СВН.

Напомним, что методика расчета потерь на корону, в том числе для горных ВЛ, в странах СНГ в свое время регламентировалась действующими “Руководящими указаниями по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1500 кВ”, изданными в Москве в 1975 году (РУ-75) [4]. Однако практика проектирования и результаты последующих исследований коронного разряда показали, что расчет потерь мощности на корону для горных ВЛ по предложенной методике приводит к существенным погрешностям для линий, проходящих на больших высотах над уровнем моря. В связи с этим в 2009 г. в Российской Федерации была выпущена новая редакция этого документа под номером РД 34.20.172.СО153.3420.172 (РУ-2009). К большому сожалению, РУ-2009 [5] практически ничем не отличался от предыдущего РУ-75. В него не были внесены соответствующие уточнения, изменения и дополнения, предлагавшиеся ранее нами и другими исследователями.

Дальнейшее использование этих документов в проектной практике, а также обобщение результатов многолетних исследований и других опубликованных материалов показали, что до настоящего времени так и не существует точной методики расчета среднегодовых потерь мощности от короны на проводах горных ВЛ СВН. В связи с этим, под руководством авторов настоящей статьи по заказу Министерства энергетики Кыргызской Республики была выполнена научно-исследовательская работа “Проведение исследований потерь электроэнергии в сетях напряжением 110–500 кВ Кыргызской энергосистемы с целью корректировки нормативных характеристик и разработки соответствующих нормативных документов” [1]. Был разработан проект нормативно-технического документа “Руководящие указания по оценке потерь мощности от коронного разряда на ВЛ 220–500 кВ с учетом физико-географических и метеорологических условий Кыргызской Республики”, который передан заказчику в 2024 году.

Основой этого документа является разработанная нами уточненная методика расчета среднегодовых потерь мощности от короны на проводах горных ВЛ СВН с учетом влияния сложных природно-климатических условий горных регионов. Материалом для разработки методики послужили результаты многолетних исследований, выполненных под руководством авторов настоящей статьи, с учетом опубликованных в научной литературе зарубежных и отечественных исследований [1–3, 6–7, 8–10].

В настоящей статье приводится сокращенный рамочный вариант уточненной методики расчета потерь от короны на проводах горных ВЛ СВН. Полная версия методики, с научными обоснованиями, доказательствами и математическими выкладками приведены в работах [1, 10].

Такие линии электропередачи проходят в районах, характеризующихся широким диапазоном географических и природно-климатических условий – от предгорных равнин до горных ущелий, плато и перевалов с отметками более 3000 м н.у.м. На протяжении одной и той же трассы ВЛ имеются участки с различными природными геофизическими и климатическими характеристиками и своеобразным расположением относительно рельефа местности. Это связано с тем, что несмотря на сравнительно небольшую площадь (198,5 тыс. кв. км), и протяженность территории с востока на запад (925 км) и с севера на юг (459 км), в Кыргызстане представлены все типы климатов – от резко-континентального до морского (из-за наличия крупного незамерзающего озера Иссык-Куль). В связи с этим, на различных участках одной и той же ВЛ влияние природно-климатических условий будет отличаться друг от друга. Особенно это существенно сказывается на потерях мощности от короны, величины которых на разных участках могут отличаться друг от друга в разы, в зависимости от высоты местности, т. е. от относительной плотности воздуха δ и метеорологических условий (чем выше высота н.у.м., тем ниже δ и больше уровень потерь на корону [11]). Поэтому расчет среднегодовой мощности потерь от короны на горных ЛЭП имеет свои специфические отличия от равнинных линий.

На основании всего изложенного выше, методика расчета среднегодовых потерь мощности от короны на горных ВЛ сводится к следующему:

Учитывая, что горная ВЛ проходит по очень сложной пересеченной местности с большими перепадами высот (от 500 до 4000 м н.у.м.) и, соответственно, с разными значениями плотности окружающего воздуха δ (от 1,0 до 0,6), трасса ВЛ делится на ряд участков $l_1, l_2, \dots, l_j, \dots, l_n$, отличающихся по высоте местности H до 500 м н.у.м. (такое различие H не приводит к существенным отклонениям δ). Длина участков может быть различной в зависимости от рельефа местности.

Вычисляется удельная мощность потерь от короны на каждом l_j -ом участке ВЛ с учетом его территориального расположения, высоты над уровнем моря, погодных условий и осадков.

Удельная мощность потерь от короны на каждом отдельном участке вычисляется с учетом относительной плотности воздуха δ и группы погоды (см. далее п.3) по предложенной нами формуле [3]:

$$\bar{P}_j = \frac{E_0^2(1)}{E_0^2(0)} n r_0^2 \exp \left\{ A \left[\left(\frac{E_0(0)}{E_0(1)} \right)^\alpha \frac{E}{E_0(0)} \right]^2 + B \left(\frac{E_0(0)}{E_0(1)} \right)^\alpha \frac{E}{E_0(0)} + C \right\}, \text{ кВт/км}, \quad (1)$$

где n – число составляющих проводов в расщепленной фазе; r_0 – радиус составляющих расщепленного провода, см; A , B , C и α – коэффициенты погоды, зависящие от погодных условий (их значения приведены в таблице 1), для соответствующих групп погоды [11]; E – напряженность электрического поля на поверхности проводов при среднегодовом напряжении на линии.

Таблица 1 – Значения коэффициентов погоды

Обозначение коэффициента	Группа погоды			
	Хорошая погода (х.п.)	Сухой снег (с.с.)	Дождь (д.)	Изморозь (из.)
A	0	0,053	–11,02	–8,92
B	9,22	8,98	24,73	20,33
C	–8,89	–7,59	–11,88	–8,63
α	1	0,9	0,8	1

Для ВЛ с одиночными проводами напряженность E электрического поля на поверхности провода определяется по известной формуле:

$$E = \frac{q 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 r_0} \text{ кВ/см}, \quad (2)$$

здесь q – линейная плотность заряда на проводе; r_0 – радиус одиночного провода, см; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi 9 \cdot 10^9}, \text{ ф/м}. \quad (3)$$

Для ВЛ с расщепленными проводами в фазе средняя напряженность поля на поверхности составляющего провода определяется по формуле:

$$E = \frac{q 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 n r_0} \text{ кВ/см}, \quad (4)$$

где r_0 – радиус составляющих расщепленного провода, см; n – число составляющих проводов в расщепленной фазе.

Расчет напряженности поля на проводах можно также выполнить с использованием значений емкостей [4, 5], при этом используется рабочая емкость провода, которая определяется как отношение линейной плотности заряда провода к фазному напряжению ВЛ.

Например, для трехфазной ВЛ с одиночными и расщепленными проводами:

$$E = 0,0147 \frac{C_k U}{n r_0} \text{ кВ/см}, \quad (5)$$

где C_k – рабочая емкость k -й фазы ВЛ, пФ; U – среднее эксплуатационное за год линейное напряжение вдоль ВЛ (действующее значение), кВ.

$E_0(1)$ – начальная напряжённость короны на проводах равнинной ВЛ при относительной плотности воздуха $\delta = 1$, кВ/см;

$E_0()$ – начальная напряжённость короны на горной ВЛ при $\delta < 1$.

Величины $E_0(1)$ и $E_0()$ вычисляются по формуле [5]:

$$E_0 = 24,5m \left(1 + \frac{0,613}{(r_0)^{0,4}} \right), \text{ кВ/см}, \quad (6)$$

где δ – относительная плотность воздуха; m – коэффициент негладкости провода; r_0 – радиус составляющих расщепленного провода, см.

При вычислении $E_0(1)$ по формуле (6), относительная плотность воздуха принимается равной единице, $\delta = 1$. При вычислении $E_0(\delta)$, значение δ выбирается из таблицы 2 в зависимости от высоты местности [11].

Относительная плотность воздуха δ зависит от высоты расположения трассы ЛЭП над уровнем моря (н.у.м.) (таблица 2).

Таблица 2 – Средние годовые значения относительной плотности воздуха на различных высотах над уровнем моря на территории Кыргызстана

Высота н.у.м., м	250	750	1250	1750	2250	2750	3250	3750	4250
Относительная плотность воздуха,	1,001	0,952	0,904	0,858	0,814	0,772	0,732	0,693	0,657

С увеличением высоты понижается плотность воздуха. Для равнинных ВЛ, расположенных на высотах до 1000 м н.у.м., относительная плотность воздуха изменяется незначительно и находится в пределах от 1 до 1,07. Для горных ВЛ, проходящих на больших высотах (от 1000 до 4000 м н.у.м.), значения δ может понижаться до величины 0,7, а в некоторых случаях и ниже. Значения плотностей воздуха δ в таблице 2 получены авторами по результатам многолетних собственных исследований [10, 11].

Коэффициент негладкости m в формуле (6) характеризует состояние поверхности провода. Он введен в эту формулу в связи с тем, что на реальных ВЛ используются витые провода, т. е. наружная поверхность которых состоит из ряда алюминиевых жил круглого сечения. На таких проводах помимо неровностей, обусловленных проволоками верхнего повива, всегда встречаются повреждения поверхности различного вида (царапины, заусеницы и др.), нанесенные во время монтажа.

Указанная негладкость, шероховатость поверхности провода приводит к локальному усилению напряженности электрического поля и, как следствие, коронный разряд в различных точках провода будет возникать при меньших напряжениях, чем начальное напряжение короны на гладких проводах, и соответственно E_0 будет иметь меньшее значение, что учтено в формуле (6) введением коэффициента негладкости m . По результатам исследований [9] для витых сталеалюминиевых проводов типа АС, АСО и АСУ, значение коэффициента негладкости необходимо принимать равным $m = 0,82$, как для равнинных, так и для горных ВЛ, независимо от способа монтажа, в отличие от ошибочных значений $m = 0,72$ – $0,78$, предложенных в РУ-2009 [5] для горных ВЛ.

На величину мощности потерь от короны, помимо относительной плотности воздуха, существенное влияние оказывают различные погодные условия и атмосферные явления – повышенная влажность воздуха, туман, твердые и жидкие осадки, отложения на проводах в виде налипшего (намерзшего) снега, изморози, гололеда и др., которые приводят к повышению уровня потерь мощности на корону по сравнению с уровнем потерь при хорошей погоде. Особенно сильное влияние оказывают атмосферные осадки в виде дождя и изморози.

Влияние других видов погодных условий на потери мощности от короны может быть слабее вследствие того, что на функционирующих воздушных линиях под действием токов нагрузки, провода нагреваются до определенной температуры и поэтому на их поверхности не образуются атмосферные отложения в виде инея, росы, кристаллической изморози или мельчайших капелек воды (туман, повышенная влажность воздуха, дождь малой интенсивности). Вследствие этого, потери на корону при указанных метеорологических условиях не превышают уровня потерь в хорошую погоду. В силу этого, все различные виды погодных условий рекомендуется разделить (объединить) на следующие четыре основные группы погоды, каждая из которых характеризуется своим уровнем удельных потерь [4, 5]:

- первая группа – хорошая погода (х.п.);
- вторая группа – сухой снег (с.с.). К сухому снегу относятся также снежная крупа, снежные зерна, ледяные иглы, метели, метели с выпадением снега (за исключением низовой метели и поземок, которые не достигают проводов);
- третья группа – дождь (д). К дождям следует относить также морось и мокрый снег, так как их влияние на потери на корону и на уровень радиопомех близко к влиянию дождя;
- четвертая группа – изморозь (из). В группу изморози входят также: гололед, замерзший снег и мокрый замерзший снег.

Все остальные виды погоды относятся к группе хорошей погоды.

Таким образом, для расчета среднегодовой мощности потерь на корону для любого участка горной ВЛ необходимо иметь сведения о средней продолжительности за год основных групп погоды, приведенных выше.

При вычислении среднегодовых потерь на корону обычно используются не абсолютные значения продолжительности вида погоды, а их относительные значения (доля в рассматриваемом году) или вероятности групп погоды ψ_i , которые для соответствующих групп обозначаются как:

$\psi_{х.п.}$ – вероятность хорошей погоды;

$\psi_{с.с.}$ – вероятность сухого снега;

$\psi_{д.}$ – вероятность дождя и мокрого снега;

$\psi_{из.}$ – вероятность изморози.

Значения относительной длительности этих типов погод (вероятности) в году приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетные значения относительной годовой длительности погод (вероятности) для условий Кыргызстана

Относительная продолжительность погоды	Высота слоя, км							
	0,5–1	1–1,5	1,5–2	2–2,5	2,5–3	3–3,5	3,5–4	4–4,5
$\psi_{сс}$	0,007	0,016	0,024	0,033	0,041	0,050	0,058	0,067
$\psi_{д}$	0,069	0,066	0,063	0,060	0,057	0,054	0,050	0,047
$\psi_{из}$	0,041	0,039	0,037	0,035	0,032	0,028	0,025	0,021
$\psi_{хп}$	0,959	0,961	0,963	0,965	0,968	0,972	0,975	0,979

Научное обоснование полученных в таблице 3 расчетных значений длительностей различных типов погод приведено в работах [1, 11].

Среднегодовая мощность потерь на корону на j-ом участке трехфазной горной ВЛ вычисляется суммированием потерь по фазам (вычисленных отдельно для каждой фазы, так как нашими исследованиями установлено, что удельные потери на разных фазах горной ВЛ могут отличаться друг от друга) для каждой группы погоды, по формуле:

$$P_{\Sigma} = \left[\left(\bar{P}_{x.n.1j} + \bar{P}_{x.n.2j} + \bar{P}_{x.n.3j} \right) \psi_{c.c.} + \left(\bar{P}_{c.d.1j} + \bar{P}_{c.d.2j} + \bar{P}_{c.d.3j} \right) \psi_{c.d.} + \right. \\ \left. + \left(\bar{P}_{d.1j} + \bar{P}_{d.2j} + \bar{P}_{d.3j} \right) \varphi_{d.j} + \left(\bar{P}_{из.1j} + \bar{P}_{из.2j} + \bar{P}_{из.3j} \right) \psi_{из.j} \right] l_j,$$

где $\bar{P}_{x.n.1j}$, $\bar{P}_{x.n.2j}$, $\bar{P}_{x.n.3j}$, $\bar{P}_{c.c.1j}$, $\bar{P}_{c.c.2j}$, $\bar{P}_{c.c.3j}$, $\bar{P}_{d.1j}$, $\bar{P}_{d.2j}$;

$\bar{P}_{d.3j}$, $\bar{P}_{из.1j}$, $\bar{P}_{из.2j}$, $\bar{P}_{из.3j}$ – удельные потери мощности (кВт/км) для разных групп погоды на раз-

ных фазах трехфазной ВЛ, вычисленные по формуле (1);

$\psi_{x.n.j}$, $\psi_{c.c.j}$, $\psi_{d.j}$, $\psi_{из.j}$ – вероятность разных групп погоды за год на j -ом участке ВЛ (таблица 3);

l_j – длина j -го участка линии в км.

Среднегодовая мощность потерь от коронного разряда всей линии P_{Σ} определяется суммированием потерь мощности P_j отдельных участков линии $l_1, l_2, l_3, \dots, l_j, \dots, l_n$:

$$P_{\Sigma} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_j + \dots + P_n, \text{ кВт} \quad (8)$$

или в общем виде:

$$P_{\Sigma} = \sum_{j=1}^n P_j \quad (9)$$

Выводы. Выбор сечения проводов и конструкции фазы линий электропередачи высокого напряжения 220–500 кВ в природно-климатических условиях горных регионов должен проводиться с учетом ограничения коронного разряда.

Разработана уточненная методика расчета среднегодовых потерь мощности от короны на проводах горных ВЛ СВН с учетом влияния сложных природно-климатических условий.

Поступила: 23.06.2025; рецензирована: 07.07.2025; принята: 09.07.2025.

Литература

1. Проведение исследований потерь электроэнергии в сетях напряжением 110–500 кВ Кыргызской энергосистемы с целью корректировки нормативных характеристик и разработки соответствующих нормативных документов: отчеты НИР / НИИ Энергетики при Минэнерго КР за 2021–2022 годы / исполнители: Ш.Б. Дикамбаев, Ю.П. Симаков, О.А. Подрезов и др. Бишкек, 2022. 144 с.
2. Дикамбаев Ш.Б. Оценка потерь мощности от коронного разряда на проводах горных воздушных линий сверхвысокого напряжения по обобщенным характеристикам / Ш.Б. Дикамбаев, Ю.П. Симаков // Вестник КРСУ. 2023. Т. 23. № 8. С. 9–16.
3. Симаков Ю.П. Учет климатических и атмосферных изменений при оценке потерь мощности от коронного разряда на горных линиях электропередачи сверхвысокого напряжения / Ю.П. Симаков, Ш.Б. Дикамбаев // Вестник КРСУ. 2024. Т. 24. № 8. С. 96–104.
4. 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 800–1500 кВ. М.: СЦНТИ, ОРГРЭС, 1975. 80 с.
5. Руководящие указания по учету потерь мощности на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330–750 кВ и постоянного тока 800–1500 кВ. М., 2009. 78 с.
6. Дикамбаев Ш.Б. Исследование потерь мощности на корону на ВЛ переменного тока в условиях высокогорья / Ш.Б. Дикамбаев, И.О. Ордоков, В.Р. Шеленберг // Вопросы техники высоких напряжений горных линий электропередачи: сб. науч. тр. ЭНИН им. Кржижановского. М., 1984. С. 5–11.
7. Дикамбаев Ш.Б. Коронный разряд на высокогорных воздушных линиях переменного тока. Общая информация. Сер. Электрические сети и системы. 1989. Вып. 7 / Ш.Б. Дикамбаев, В.А. Костюшко, И.О. Ордоков, В.Р. Шеленберг. М.: Информэнерго, 1989. 48 с.
8. Исследование потерь мощности на корону на высокогорных линиях электропередачи переменного тока. Исследования и испытания в электропередачах 750–150 кВ / Ш.Б. Дикамбаев, В.А. Костюшко, И.О. Ордоков, Н.П. Емельянов // Сб. науч. тр. ВНИИЭ. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 131–141.

9. *Дикамбаев Ш.Б.* Влияние электрического поля на состояние поверхности проводов горных воздушных линий. Повышение эффективности электрических сетей 110–1150 кВ / Ш.Б. Дикамбаев // Сб. научн. тр. НИИПТ. Л., 1990. С. 51–58.
10. Исследование влияния изменений природно-климатических условий Кыргызстана на режимы работы энергосистемы и разработка предложений и новых конструктивных решений, повышающих надежность и устойчивость энергообъектов: отчет о НИР / НИИЭ при Минэнерго КР за 2023–2024 гг. / исполнители: к.т.н. Ш.Б. Дикамбаев, к.т.н. Ю.П. Симаков и др. Бишкек, 2024. 113 с.
11. *Подрезова Ю.А.* Оценка высотных зависимостей плотности воздуха и длительности различных типов погод в Кыргызстане для расчета потерь мощности на корону проводов горных ЛЭП / Ю.А. Подрезова, Ш.Б. Дикамбаев // Вестник КРСУ. 2022. Т. 24. № 8. С. 181–189.