

СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА КОРОНУ НА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

АВТОРЫ:

В.А. КОСТЮШКО,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Л.В. ТИМАШОВА,
К.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

А.С. МЕРЗЛЯКОВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

И.А. НАЗАРОВ,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

С.М. МИХАЙЛОВ,
SWISSNANOCOAT

Образование короны на проводах ЛЭП связано с ионизацией воздуха у проводов и протекании разрядного тока между ними, сопровождающемся характерным потрескиванием, образованием озона и окислов азота, фиолетовым свечением

(ореолом) вблизи поверхности проводов. Коронный разряд приводит к коррозии проводов. Помимо потерь электроэнергии в линии, такой разряд вызывает коррозию проводов и приводит к ухудшению работы элементов проводной связи и высокочастотных установок.

Ключевые слова: воздушная линия электропередачи переменного тока; потери мощности на корону; ток нагрузки; провода с гладкой внешней поверхностью; расширенные провода; ферромагнитное покрытие; точка Кюри; гололедо-изморозевые отложения.



Потери мощности на корону в воздушных линиях существенно зависят от погодных условий

Потери мощности на корону (ПК) зависят от напряжения воздушных линий (ВЛ), конструкции фазы (число проводов в фазе, марка, диаметр проводов, шаг расщепления), расстояния между фазами, тока нагрузки ВЛ. Проведенные многолетние исследования показали, что ПК существенно зависят от погодных условий: хорошая погода (ХП), сухой снег, дождь (мокрый снег), повышенная влажность воздуха (ПВ), роса, туман, иней, кристаллическая изморозь (КИ), зернистая изморозь (ЗИ), гололед (Г) и сложные отложения на проводах (СО). ЗИ, Г, СО называются гололедо-изморозевыми отложениями — ГИО. В табл. 1 приведены средние значения ПК для ВЛ различных классов напряжения при основных видах погоды.

Как видно из табл. 1, ПК в сухой снег, дождь (мокрый снег), ГИО, КИ по сравнению с ПК при ХП возрастают в 3÷40 раз. Поскольку уровни ПК на ВЛ достигают значительных величин, целесообразно рассмотрение методов и средств, способствующих их снижению.

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА ПРОВОДОВ ТОКОМ НАГРУЗКИ НА УРОВЕНЬ ПК

Во всех странах, проводящих исследования ПК (США, Англия, Италия, Финляндия, Швеция, Норвегия, Россия), было выявлено влияние на уровень ПК значений тока нагрузки ВЛ. Ток нагрузки приводит к нагреву проводов и препятствует образованию на их поверхности влаги при росе, ПВ, слабом дожде, тумане, а также твердых отложений в виде инея, КИ и ГИО. Исследования воздействия тока нагрузки на отложения изморози¹ на про-

СРЕДНИЕ ПОТЕРИ МОЩНОСТИ НА КОРОНУ ПРИ ОСНОВНЫХ ВИДАХ ПОГОДЫ ДЛЯ ВЛ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ (ПРИ МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ПЛОТНОСТЕЙ ТОКА)

Класс напряжения, кВ	Конструкция фазы (число и марка провода; радиус провода r_0 , см; шаг расщепления a , см)	Средние потери на корону при различных видах погоды, кВт/км			
		хорошая погода	сухой снег	дождь (мокрый снег)	ГИО, КИ
220	АС×240/32 $r_0 = 1,08$	0,8	2,5	8,7	24,5
330	2×АСО-300 $r_0 = 1,175, a = 40$	1,0	3,6	12,3	39
500	3×АС-400/51 $r_0 = 1,375, a = 40$	2,2	8,5	29,0	87
750	4×АС-400/64 $r_0 = 1,385, a = 60$	7,9	31,9	83,8	220

Таблица 1

ГИСТОГРАММА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОТЛОЖЕНИЙ ИЗМОРОЗИ НА ОДИНОЧНОМ ПРОВОДЕ СЕЧЕНИЕМ 564 ММ² В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ТОКА НАГРУЗКИ (а, б, в — РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ИЗМОРОЗИ)

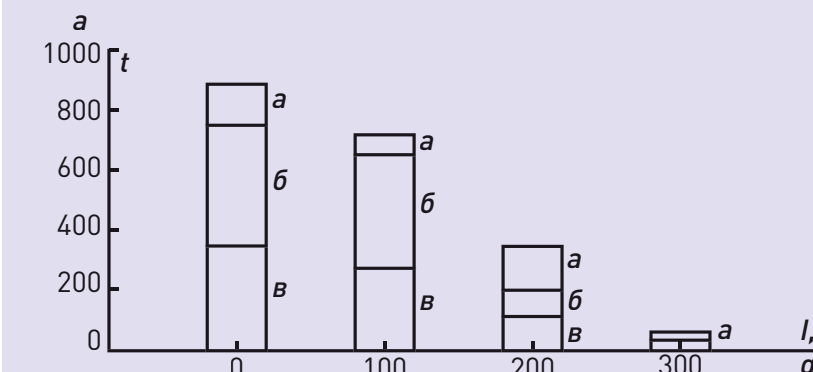


Рис. 1

¹ В данном разделе использованы материалы из работы [1].

ПОТЕРИ МОЩНОСТИ НА КОРОНУ ПРИ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ ИЗМОРОЗИ $P_{ки}$ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ $E_{ср}$ ПРИ ПЛОТНОСТИ ТОКА $J = 0,5 \text{ А/мм}^2$ (КРИВАЯ 1) И НА ПРОВОДАХ ПРИ $J = 0 \text{ А/мм}^2$ (КРИВАЯ 2)

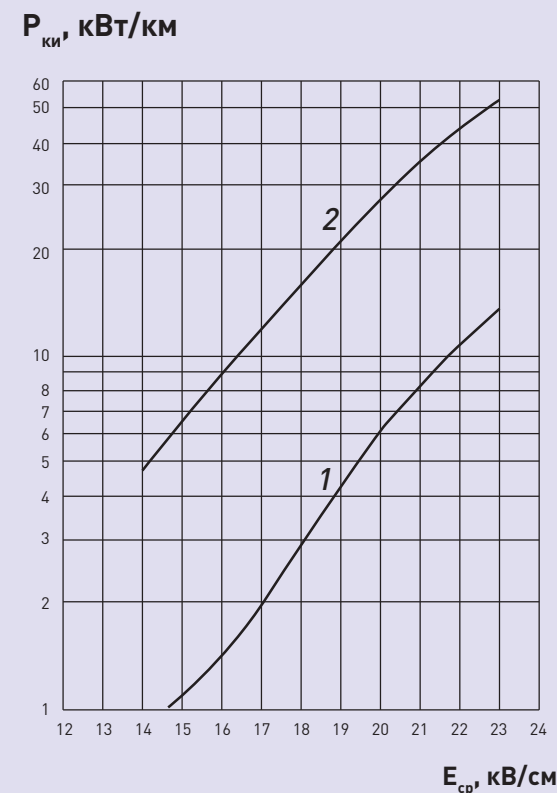


Рис. 2

дах ВЛ и на ее продолжительность были проведены в Финляндии в естественных условиях [1].

На рисунке 1 представлена гистограмма продолжительности отложенной изморози на одиночном проводе сечением 564 мм^2 в зависимости от величины тока нагрузки, которая показывает, что при токе нагрузки 300 А продолжительность изморози на проводе существенно уменьшилась по отношению к $I = 0 - 200 \text{ А}$.

На опытном пролете АО «НТЦ ФСК ЕЭС» в течение нескольких зимних сезонов проводились исследования влияния тока нагрузки на величину ПК при КИ на проводах $4 \times \text{АСО}-600$. В результате исследования было определено, что при плотности тока $j = 0,5 \text{ А/мм}^2$ величина ПК при КИ уменьшается в 4–5 раз (рис. 2), а при $j > 0,9 \text{ А/мм}^2$ КИ на проводах не образовывалась. При этом уровень ПК соответствовал уровню ПК в ХП.

На опытном пролете АО «НТЦ ФСК ЕЭС» также были получены данные о влиянии плотности тока на уровень ПК при росе, ПВ, тумане и слабом дожде.

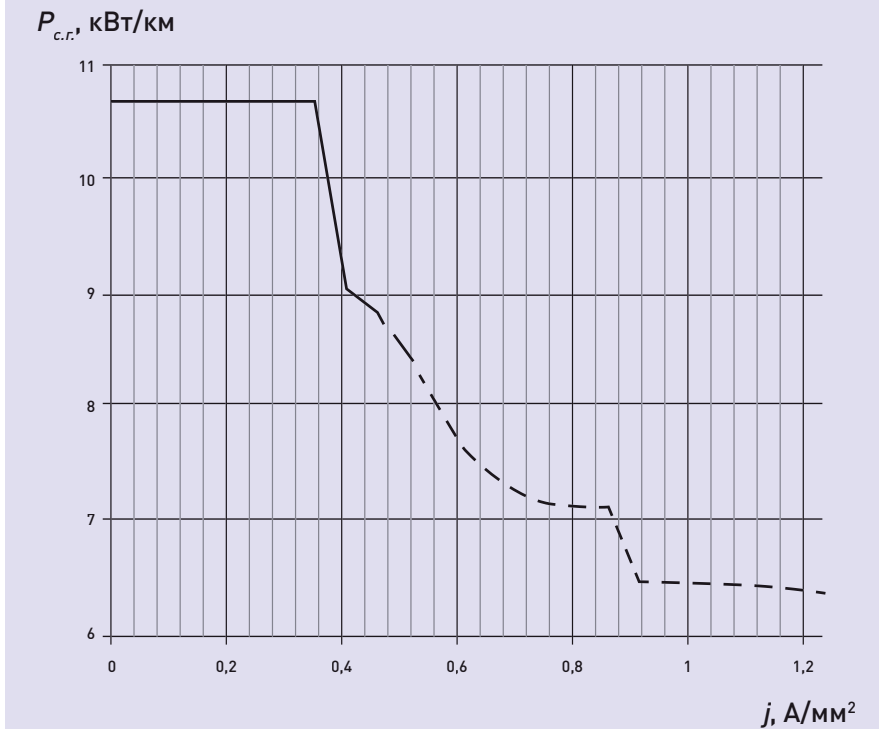
Влияние нагрева проводов при расчете потерь учитывается путем уменьшения уровней ПК и продолжительностей отдельных видов погоды (роса, ПВ, туман, иней, изморозь). В разных странах этот учет проводится по-разному.

На основании совокупности экспериментальных данных, полученных в нашей стране и за рубежом, было введено понятие критической плотности тока для видов погоды, при которых проявляется влияние тока нагрузки. Критическая плотность тока — это наименьшая плотность тока в проводе, начиная с которой под действием нагрева проводов происходит изменение абсолютных значений ПК при КИ, и расчетных продолжительностей следующих видов погоды: КИ, ПВ, тумана, росы, инея. Значения критической плотности тока зависят от вида погоды и диаметра провода. На величину ПК в ГИО и сухой снег плотность тока влияет незначительно.

В АО «НТЦ ФСК ЕЭС» разработан алгоритм и программное обеспечение расчетов ПК при различных плотностях токов. В качестве примера влияния плотности тока на уровень среднегодовых потерь на корону $P_{с.г.}$ на рис. 3 приведена зависимость $P_{с.г.}$ от плотностей тока j на ВЛ 500 кВ.

В настоящее время в России на ВЛ различных классов напряжения плотности токов существенно различаются и, как правило, меньше заложенных при проектировании. Поэтому для корректных оценок $P_{с.г.}$ при проектировании и эксплуатации ВЛ особую актуальность приобретает вопрос об учете плотностей тока на ВЛ.

ЗАВИСИМОСТЬ $P_{с.г.}$ ОТ ПЛОТНОСТЕЙ ТОКА J НА ВЛ 500 КВ (ПРОВОД $3 \times \text{АСО}-400$, $R_0 = 1,36 \text{ см}$, ШАГ РАСЩЕПЛЕНИЯ $A = 40 \text{ см}$, ТИП ОПОРЫ ПБ500-5Н)



Пунктиром показана величина $P_{с.г.}$ с учетом изменения отдельных видов погодных условий

Рис. 3

АО «НТЦ ФСК ЕЭС» и АО «НТЦ ФСК ЕЭС» по заказу ПАО «ФСК ЕЭС» был разработан проект СТО ПАО «ФСК ЕЭС» «Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводников линий электропередачи переменного тока 220–1150 кВ и постоянного тока 1500 кВ». В проект вошла методика и программное обеспечение определения ПК с учетом плотности тока. В настоящее время используются «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», выпущенные в 1975 г.

ПОТЕРИ НА КОРОНУ НА ВЛ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРОВОДОВ С ГЛАДКОЙ ВНЕШНЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

При оценке ПК на проводах были введены понятия «общей» и «местной» короны. Местная корона связана с коронным разрядом в отдельных точках провода, на которых имеются шероховатости различных видов, образующие участки с повышенными значениями напряженности электрического поля E , т.е. местная корона. С ростом напряженности электрического поля E_0 возникает общая корона, при которой поверхность провода в условиях ХП начинает коронировать.

В нормативном документе [2] для определения E_0 (кВ/см) в условиях ХП на проводах используется формула:

$$E_0 = 24,5 \cdot m \cdot \delta \left(1 + \frac{0,613}{r \cdot \delta^{0,4}} \right), \quad [1]$$

где δ — относительная плотность воздуха;

m — коэффициент негладкости поверхности провода;

r_0 — радиус провода.

На основании экспериментальных данных для витых сталеалюминиевых проводов марок АС, АСУ, АСО

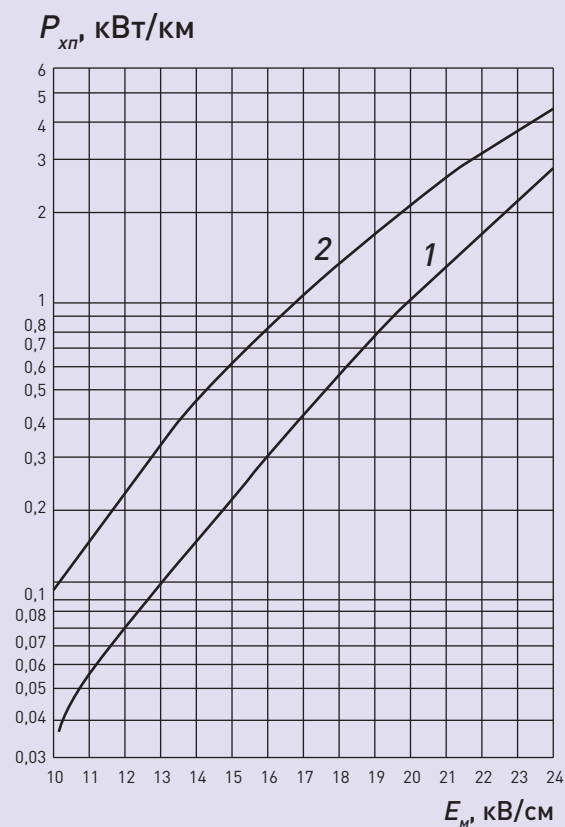
рекомендуется принимать значение коэффициента $m = 0,82$. Это связано с тем, что поверхность проводов марки АС свита из большого числа отдельных проволок и поэтому не является гладкой. У проводов с более гладкой внешней поверхностью величина m в ХП приближается к 1.

ПК зависят от отношения E/E_0 [2]. С ростом E_0 отношение E/E_0 уменьшается, уменьшаются и ПК. Отсюда следует, что в ХП уровень ПК на проводах с более гладкой поверхностью меньше, чем на витых.

Атмосферные осадки приводят к появлению дополнительных неровностей на проводах в виде капельно-жидкой фазы при дожде, тумане и отложениях инея, КИ, ГИО. В этом случае происходит снижение коэффициента негладкости m до величин 0,45÷0,55, и ПК резко возрастают. Это означает, что влияние гладкости поверхности провода на величину ПК может проявиться только в ХП.

Эксперименты в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» показали, что ПК в ХП на гладких проводах действительно меньше по сравнению с ПК на витых проводах серии АС, что показано на рис. 4. Снижение ПК в ХП оценено в 1,5–2 раза. Некоторое снижение ПК (в 1,2÷1,3 раза) отмечено и в сухой снег. При остальных видах погоды снижения ПК на гладких проводах не происходит.

ЗАВИСИМОСТЬ ВЕЛИЧИНЫ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ НА КОРОНУ В ХОРОШУЮ ПОГОДУ ОТ НАПРЯЖЕННОСТИ ПОЛЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ВИТЫХ И ГЛАДКИХ ПРОВОДОВ (ДВА ПРОВОДА В ФАЗЕ, ШАГ РАСЩЕПЛЕНИЯ 40 СМ)



1 — гладкий провод ($r_0 = 1,8$ см); 2 — витой провод АС 750/93 ($r_0 = 1,855$ см)

В настоящее время большое распространение получили компактированные провода нового поколения с достаточно гладкой внешней поверхностью.

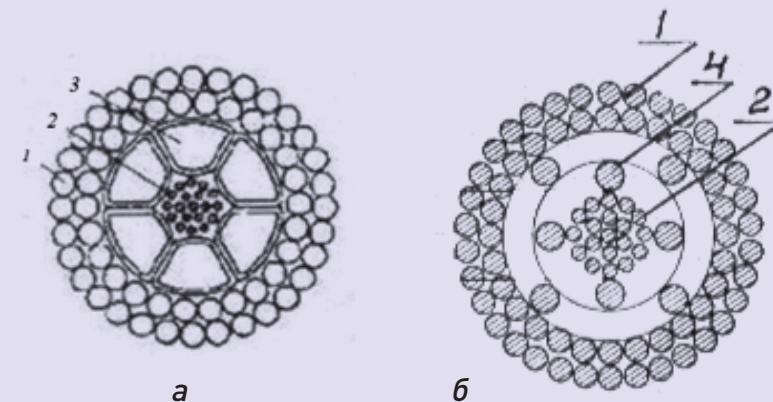
Учитывая, что на территории РФ продолжительность ХП составляет 50–70%, а продолжительность сухого снега — до 10%, использование проводов нового поколения с гладкой поверхностью может привести к снижению $P_{с.г.}$. Однако сохранение степени гладкости поверхности таких проводов в процессе эксплуатации требует экспериментальной проверки.

ПОТЕРИ НА КОРОНУ НА ВЛ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАСШИРЕННЫХ ПРОВОДОВ С УВЕЛИЧЕННЫМ ДИАМЕТРОМ

ПК, радио, телевизионные и акустические помехи зависят от диаметра провода. Это связано с тем, что напряженность электрического поля на поверхности проводов обратно пропорциональна диаметру провода, что приводит к их снижению при увеличении диаметра. Поэтому одним из методов уменьшения ПК и помех является увеличение диаметра провода. Однако при высоких напряжениях ВЛ использование традиционных сталеалюминиевых проводов большого диаметра находится в противоречии с сечением проводящей алюминиевой части провода, выбираемой из условия передачи по ВЛ заданной мощности.

Применение традиционных проводов многопроволочной конструкции

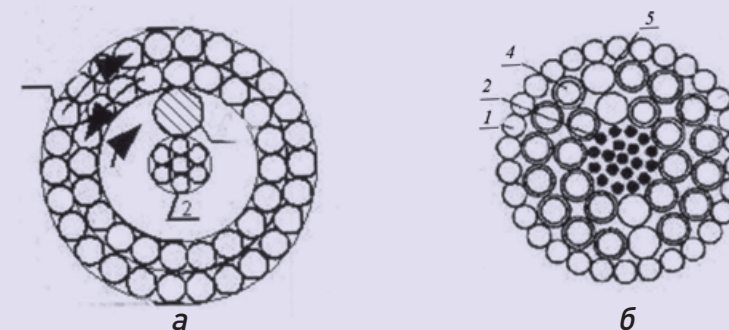
КОНСТРУКЦИИ РАСШИРЕННЫХ ПРОВОДОВ, РАЗРАБОТАННЫХ В США



1 — токопроводящие алюминиевые жилы;
2 — стальные проволоки сердечника;
3 — секторные алюминиевые трубки каркаса трапециевидальной формы;
4 — спираль из алюминиевых проволок, образующая каркас расширенного провода.

Рис. 5

КОНСТРУКЦИИ РАСШИРЕННЫХ ПРОВОДОВ, РАЗРАБОТАННЫХ В СССР



1 — токопроводящие алюминиевые жилы;
2 — стальные проволоки сердечника;
3 — спираль из алюминиевой проволоки, образующая каркас расширенного провода;
4 — круглые алюминиевые трубки каркаса;
5 — круглые алюминиевые проволоки.

Рис. 6

с увеличенным диаметром неэкономично также и потому, что сечение проводящей части провода используется не полностью. Экономически

обоснованное решение для проводов большого диаметра возникает при применении так называемых расширенных проводов, диаметры

которых не связаны с сечением проводящей части.

Увеличение диаметра проводов при сохранении сечения проводящей части возможно за счет использования внутри провода различных наполнителей, в том числе алюминиевых трубок, секторных каркасов, опорных внутренних спиралей из алюминиевых проволок и др. Возможно использование конструкции расширенных проводов со стеклопластиковым наполнителем. Такие конструкции позволяют избежать перерасхода цветного металла и удорожания ВЛ.

Расширенные провода применялись, например, на ВЛ 345 и 500 кВ в США и на ВЛ 380 кВ в Италии. Первоначально расширенные провода использовались на ВЛ как одиночные.

На рисунке 5 показаны две конструкции расширенных проводов, разработанных в США:

- вариант а — используются полые секторные алюминиевые трубки каркаса трапециевидальной формы;
- вариант б — воздушные полости образованы двумя повивами алюминиевых проводов с малым числом жил; разработан для применения в качестве одиночного провода для ВЛ 500 кВ с активным сечением 1500 мм².

В СССР были разработаны две конструкции расширенных проводов (рис. 6):

- вариант а — провод АСОД с одной каркасной проволокой по стальному сердечнику. Провода такой конструкции имели сечения алюминиевой части 400 и 600 мм² и наружные диаметры соответственно 33,1 и 41,3 мм. Стрелками на рисунке показаны направления повивов алюминиевых жил;

– вариант б — на сердечник из стальных жил накладываются два повива круглых алюминиевых трубок каркаса. В каждом повиве алюминиевых трубок находятся по две круглые алюминиевые проволоки того же диаметра. Эти проволоки придают большую жесткость проводу и принимают на себя давление последующего повива.

Провода предназначались для подвески на опытном участке ВЛ 750 кВ Конаково — Москва в составе расщепленной фазы. Уже в 1970-х гг. в СССР наиболее перспективным применением расширенных проводов считалось их включение в состав расщепленной фазы. В этом случае создается возможность использования меньшего числа проводов, что важно для снижения гололедных и ветровых нагрузок.

В Китае в последнее время также применяются расширенные провода в составе расщепленной фазы на ВЛ 750 кВ. Первоначально в Китае были сконструированы расширенные провода с каркасом в виде спирали из алюминиевых проволок (рис. 5 б и 6 а). Однако такая конструкция оказалась не вполне стабильной.

В процессе колебаний проводов при пляске и вибрации алюминиевые проволоки верхнего повива выходили из зацепления и создавали на поверхности провода очаги короны. Поэтому был сконструирован провод с жестким внутренним каркасом (рис. 7), который применяется на ВЛ 750 кВ в составе расщепленной фазы. Предполагается использование указанных проводов на проектируемой ВЛ 1100 кВ.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ФЕРРОМАГНИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ПРОВОДОВ С НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ КЮРИ

Борьба с обледенением ВЛ ведется для уменьшения аварийности

в гололедоопасных регионах. Согласно обзору, представленному в декабре 2010 г. рабочей группой В2.29 СИГРЭ, о «Системах предсказания, мониторинга и борьбы с обледенением высоковольтных линий передач», имеется широкая палитра предложений разных методов для борьбы с обледенением ВЛ, таких как плавка гололеда, гидрофобные и гидрофильные покрытия, опрыскивания противобледенительными жидкостями, снегоотталкивающие кольца и грузы, препятствующие закручиванию проводов, и др.

Анализ показывает, что большинство этих методов, за исключением плавки гололеда, сложны, недостаточно эффективны, ненадежны и дают кратковременный эффект. Наиболее перспективным, с нашей точки зрения, является метод, использующий покрытие поверхности проводов ферромагнитными материалами с низкой температурой Кюри.

Как известно, твердые вещества делятся на парамагнетики и ферромагнетики. Общее у этих материалов то, что их атомы имеют свой магнитный момент.

Парамагнетики — слабо магнитные вещества. У них магнитная проницаемость $\mu \approx 1,0$.

Ферромагнетики — вещества, способные сильно намагнититься в магнитном поле, поскольку они содержат железо. У сплавов железа с никелем μ может достигать 25 000. Ферромагнетик — частная фаза парамагнетика, когда все магнитные моменты атомов направлены в одну сторону. При этом переход парамагнетика в фазу ферромагнетика и наоборот зависит от температуры вещества.

Точка Кюри, или температура Кюри, — температура фазового пе-

ПОЛУЧЕНИЕ ТОЧКИ КЮРИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ ОКОЛО 0 °С В СОСТАВЕ СПЛАВА НИКЕЛЬ–МАРГАНЕЦ

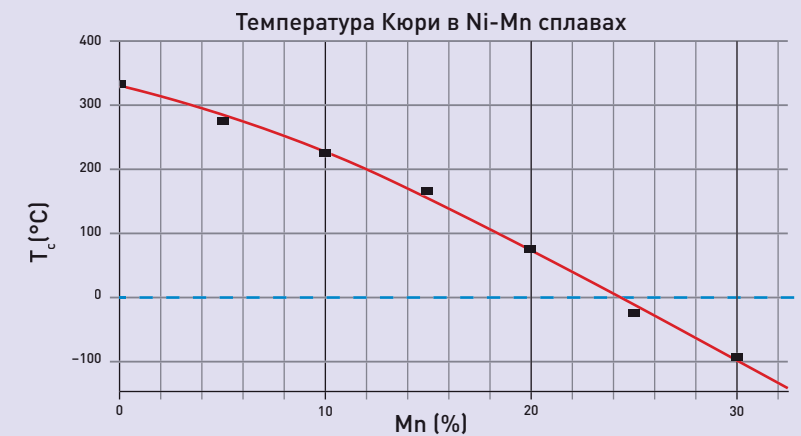


Рис. 8

рехода, связанного со скачкообразным изменением свойств магнитной симметрии вещества.

При температуре выше точки Кюри вещество является парамагнетиком. При снижении температуры ниже точки Кюри парамагнетик произвольно (спонтанно) превращается в ферромагнетик. Как известно, образование ГИО и КИ на проводах происходит при отрицательных температурах. Если на поверхность провода тонким слоем нанести покрытие из сплава с точкой Кюри около 0 °С, то при температурах меньше 0 °С сплав становится ферромагнетиком. При этом под действием переменного тока, протекающего по проводу, происходит перемагничивание покрытия провода, которое является уже ферромагнетиком. Поскольку площадь петли гистерезиса у ферромагнетика существенно выше, чем у парамагнетика, в покрытии выделяется тепло, препятствующее образованию на проводе ГИО, КИ, инея.

Провода, покрытые такими сплавами, являются самозащищаемыми от обледенения. Нагрев автоматически включается, когда температура провода становится ниже температуры Кюри, т.е. не требуется вмешательства технического персонала и прогноза метеорологической обстановки. Таким образом, метод позволяет исключить самый высокий уровень ПК, который, согласно табл. 1, имеет место при ГИО и КИ. Нагрев саморегулируется и автоматически выключается при повышении температуры, когда при переходе через точку Кюри материал из ферромагнитного становится парамагнитным, т.е. в этом случае дополнительные потери на перемагничивание покрытия отсутствуют.

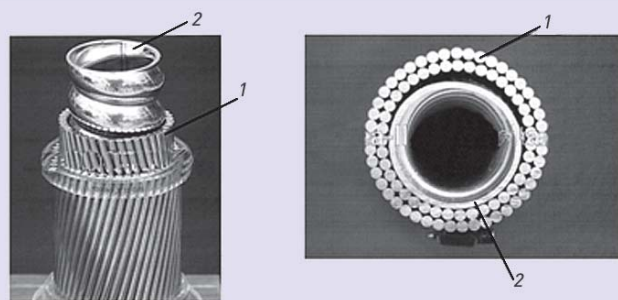
Состав материала покрытия должен быть оптимизирован с учетом температурных (точка Кюри), антикоррозийных, магнитных (высокое μ) и ценовых характеристик. Материалы с температурой Кюри близкой к 0 °С — это, прежде всего, никелевые сплавы. На рис. 8 по-

ИНФОРМАЦИЯ

Коронный разряд на проводах линий электропередачи — это типичный пример проявления ионизации воздуха в больших неоднородных электрических полях. Явление состоит в возникновении слабого свечения вокруг проводов и сопровождается хорошо слышимым сухим потрескиванием. Помимо проводов, коронный разряд может возникать на верхушках деревьев, мачтах — т. н. огни святого Эльма. Как известно, обязательным условием возникновения разряда в газах является наличие в нем свободных зарядов — электронов и ионов. Именно такие условия существуют около проводов ЛЭП. Еще одно условие возникновения короны — наличие сильного неоднородного электрического поля. Подобные поля формируются у проводов с очень большой кривизной поверхности (острия, тонкие провода). Когда напряженность поля достигает предельного значения для воздуха (около 30 кВ/см), вокруг электрода возникает свечение, имеющее вид оболочки или короны (отсюда название). На линиях электропередачи возникновение коронного разряда крайне нежелательно, так как вызывает значительные потери передаваемой энергии.

Однако явление коронного заряда находит и положительное применение. На нем основываются некоторые методы очистки газов от пыли и сопутствующих загрязнений (электростатический фильтр), методы диагностики состояния различных металлических конструкций (позволяет обнаруживать трещины в изделиях).

РАСШИРЕННЫЙ ПРОВОД С ЖЕСТКИМ ВНУТРЕННИМ КАРКАСОМ (ПРОИЗВОДСТВО: КИТАЙ)



1 — токопроводящие алюминиевые жилы; 2 — жесткий внутренний каркас провода.

Рис. 7

казано изменение точки Кюри (T_c) в зависимости от состава сплавов Ni–Mn (никель–марганец). Аналогичные низкотемпературные области существуют и в сплавах Ni–Fe (никель–железо).

Впервые метод был опробован более 50 лет назад в Шотландии, но далее широко применяться не стал в виду трудностей, связанных в то время с металлургией ферромагнитного материала. Дальнейшее развитие метод получил в Японии, где он используется уже более 20 лет [3, 4]. В настоящее время в Японии более 100 линий передач оснащены проводами с ферромагнитной защитой. Зимой 2008–2009 гг. японский материал успешно прошел тестирование на базе по испытанию мер против обледенения в Квебеке (Канада). Материал, используемый в Японии и Канаде, формируется в виде спиральной ленты LS-Spiral rod, которая наматывается на фазный провод.

Однако технология изготовления спиральной ленты сложна и дорога. Существует технология, позволяющая заменить спиральные ленты путем нанесения на провода (в том числе и существующих линий) порошковых ферромагнитных покрытий с низкой температурой Кюри на основе метода безвакуумного плазменного напыления (БПН) или использовать в качестве покрытия более простую в изготовлении ферромагнитную проволоку либо комбинацию БПН + ферромагнитная проволока. При этом разработаны более дешевые ферромагнитные сплавы с точкой Кюри близкой к 0 °С.

Метод БПН разрабатывается совместно российскими и швейцарскими специалистами. В этом методе в струю холодной плазмы впрыскивается порошок наносимого материала, который струей

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ ПРОВОДА АС 240/32 С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ СОСТАВОВ 1 И 2

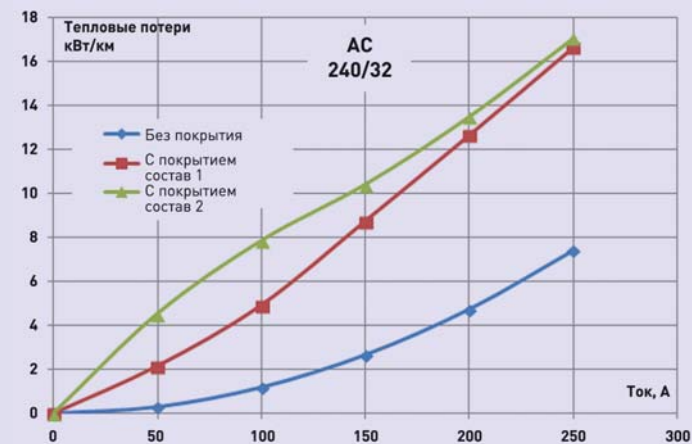


Рис. 9

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ОБРАЗЦОВ ПРОВОДА АС 120/19 С ФЕРРОМАГНИТНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ СОСТАВОВ 2 И 3

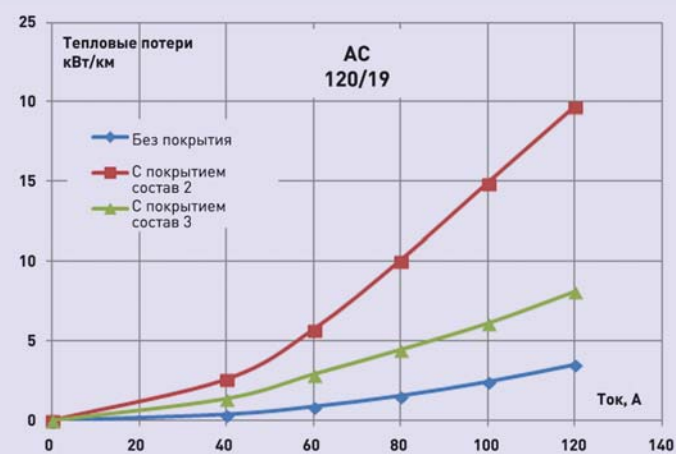


Рис. 10

проектируется на подложку. Метод не требует ни создания вакуума (работает на воздухе при атмосферном давлении), ни специальной подготовки поверхности (в том числе при нанесении на алюминий), так как поверхность подложки очищается самой струей плазмы. Метод обеспечивает отличную адгезию нанесенного покрытия с подложкой.

Ферромагнитное покрытие, кроме предотвращения образования ГИО, КИ и инея, создает свойство гидрофильности поверхности провода, что уменьшает ПК при видах погоды, при которых образуется капельно-жидкая среда на поверхности провода (роса, туман, ПВ, дождь). Покрытие также сглаживает поверхность витого провода, при этом коэффициент негладкости m увеличивается до значений 0,95–0,98.

В Центре электротехнического оборудования АО «НТЦ ФСК ЕЭС» проведены исследования и испытания антигололедных покрытий на основе ферромагнитных материалов с точкой Кюри близкой к 0 °С.

В процессе исследований:

- проведены испытания трех составов ферромагнитных покрытий;
- вместо спиральной ленты в качестве варианта покрытия предложена более простая в изготовлении проволока из ферромагнитного сплава;
- разработаны и апробированы три способа нанесения ферромагнитного покрытия на провода ВЛ:
 1. в виде безвакуумного плазменного напыления порошка;
 2. в виде ферромагнитной проволоки;
 3. комбинированный способ (проволока + БПН порошка);
- проведены испытания образцов проводов с нанесенным покрытием:

1. на отсутствие ГИО на проводах, обтекаемых током, расположенных в климатической камере в условиях, соответствующих образованию ГИО;
2. на возможность плавки после образования ГИО;
3. на адгезию и стойкость покрытия к воздействию внешних климатических и механических факторов;
4. проведены измерения тепловых потерь на образцах проводов с ферромагнитным покрытием с целью определения дополнительных потерь в покрытии при различных значениях токов нагрузки ВЛ.

Ниже описаны использованные способы нанесения ферромагнитных покрытий на провода АС 240/32 и АС 120/19, составы покрытий и результаты определения тепловых потерь на проводах с покрытием.

Способ 1: на провод методом БПН наносится порошок двух разработанных составов (состав 1 — Ni–Sn–Cu (никель–олово–медь); состав 2 — Ni–Sn–Fe–Al (никель–олово–железо–алюминий)).

Способ 2: провод предварительно армируется ферромагнитной проволокой, изготовленной из порошка состава 3 — Ni–Fe–Cu (никель–железо–медь). Затем методом БПН на провод наносится порошок состава 2.

Способ 3: провод армируется только ферромагнитной проволокой, изготовленной из порошка состава 1.

Наличие в составах порошка и сплава проволоки Ni и Fe объясняется достаточно низкими значениями точки Кюри у этих металлов, а кроме того, большой коэрцитивной силой никеля, что позволяет получить значительный энергетический эффект при перемагничивании материала. Разработанные

сплавы существенно дешевле сплавов, используемых в Японии.

На рисунках 9 и 10 показаны результаты измерений тепловых потерь образцов проводов АС 240/32 и АС 120/19 с ферромагнитными покрытиями составов 1, 2, 3, нанесенных методом БПН.

Эксперименты в климатической камере показали, что ГИО не образуются на поверхности провода АС 240/32, начиная с тока 120 А, а на проводе АС 120/19, начиная с тока 85 А.

Зависимости, приведенные на рис. 9 и 10, позволяют рассчитать дополнительные тепловые потери в ферромагнитном покрытии при различных значениях токов. Например, на ВЛ 220 кВ с проводами 1хАС 240/32 при характерной плотности тока 0,7 А/мм² (ток нагрузки $I_n = 168$ А) дополнительные потери мощности на нагрев покрытия ΔP_n (кВт/км) можно вычислить по формуле:

$$\Delta P_n = P_{\Sigma} - I_n^2 \cdot R_{pp}, \quad (2)$$

где P_{Σ} — суммарные потери мощности в проводе;

R_{pp} — омическое сопротивление провода.

В соответствии с рис. 9 $\Delta P_n = 6,48$ кВт/км.

Дополнительные потери энергии $\Delta \mathcal{E}_n$, возникающие в ферромагнитном покрытии в период отрицательных температур t_o , который примем равным 3,5 месяца в году (декабрь, январь, февраль, половина марта), составят:

$$\Delta \mathcal{E}_n = 3 \Delta P_n \cdot t_o = 49,2 \cdot 103 \text{ кВтч/км.}$$

Но при температурах $t_o < 0$ °С за счет нагрева поверхности провода происходит и экономия электроэнергии

ИНФОРМАЦИЯ

Из Приказа Министерства энергетики РФ от 30 декабря 2008 г. №326 «Об организации в Министерстве энергетики Российской Федерации работы по утверждению нормативов технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям»

2. Технологические потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям на регулируемый период рассчитываются как в целом, так и с разбивкой по уровням напряжения:

- на высоком напряжении — 110 кВ и выше (ВН);
- на среднем первом напряжении — 27,5–60 кВ (СН1);
- на среднем втором напряжении — 1–20 кВ (СН2);
- на низком напряжении — 0,4 кВ и ниже (НН).

II. Структура технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям

3. Технологические потери электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям включают в себя технические потери в линиях и оборудовании электрических сетей, обусловленных физическими процессами, происходящими при передаче электроэнергии в соответствии с техническими характеристиками и режимами работы линий и оборудования, с учетом расхода электроэнергии на собственные нужды подстанций и потери, обусловленные допустимыми погрешностями системы учета электроэнергии. Объем технологических потерь электроэнергии рассчитывается в соответствии с Методикой расчета технологических потерь электроэнергии при ее передаче по электрическим сетям в базовом периоде.

на проводах с покрытием прежде всего за счет отсутствия на проводах образований ГИО, КИ, инея, имеющих повышенный уровень ПК, а также за счет гладкости и гидрофильности покрытия.

Процесс образования ГИО, как правило, состоит из двух фаз: фазы нарастания и фазы удержания. Фаза нарастания связана с выпадением мокрого снега, дождя и сопутствующего этим видам осадков тумана.

При наличии покрытия эти осадки в фазе нарастания не приводят к образованию ГИО. В этом случае ПК снижаются до уровня ПК в дождь, мокрый снег или туман. При этом следует также учитывать, что поверхность ферромагнитного покрытия, обладающая свойством гидрофильности, способствует дополнительному снижению ПК в дождь, мокрый снег, туман.

Продолжительность удержания ГИО определяется как разность между общей продолжительностью ГИО и продолжительностью дождя, мокрого снега и сопутствующего тумана на расчетном (месячном) временном интервале. В этот период ПК в ГИО следует принять как ПК в ХП с учетом гладкости поверхности провода с покрытием.

Наличие фазы удержания подтверждается тем обстоятельством, что в большинстве случаев продолжительность ГИО превышает продолжительность мокрого снега, дождя и тумана.

Если продолжительности дождя, мокрого снега, тумана в расчетный временной интервал превышают продолжительность ГИО, то их разность рассматривается как соответствующий вид погоды (дождь, мокрый снег, туман).

При $t_0 < 0$ °С образования КИ, инея и появления капель жидкости

на поверхности проводов с покрытием при ПВ не происходит. В эти виды погоды уровень ПК соответствует уровню ПК в ХП с учетом гладкости поверхности провода. Дополнительная экономия электроэнергии в туман происходит за счет гидрофильности покрытия.

Расчетная продолжительность сухого снега, как правило, соответствует его метеорологической продолжительности. За счет гладкости покрытия в сухой снег происходит дополнительное снижение уровня ПК.

Экономия электроэнергии на проводах с покрытием при $t > 0$ °С существенно меньше, чем при $t_0 < 0$ °С.

При $t > 0$ °С, т.е. в условиях, когда провода нагреваются только за счет текущей передаваемой по ВЛ мощности (плотности тока), дополнительное снижение ПК в дождь, туман и ПВ происходит за счет гидрофильности поверхности провода с покрытием (рассматриваются плотности токов, не препятствующие образованию капельно-жидкой фазы на поверхности проводов при тумане и ПВ).

Дополнительное снижение ПК в иней и росу на проводах с покрытием при плотностях токов, при которых эти виды осадков на проводах не образуются, происходит до уровня ПК в ХП с учетом гладкости поверхности провода. Дополнительное снижение ПК в ХП также происходит за счет гладкости провода.

Оценка уровня снижения ПК на проводах с покрытием проведена для ВЛ 220 кВ Среднего Поволжья (гололедоопасный район). По данным метеостанции Ершов (Саратовская область), в декабре, январе, феврале и первой половине марта в регионе наблюдаются отрицательные температуры.

Расчетные продолжительности ГИО, дождя и мокрого снега, инея, сухого снега, тумана, ПВ, ХП при помесечной обработке метеоданных с учетом приведенных выше замечаний за 3,5 месяца составили соответственно 745, 156, 308, 257, 89, 95, 1038 ч. При этом 156 ч дождя и мокрого снега приходится на фазу нарастания ГИО. Аналогично при $t > 0$ °С расчетные продолжительности дождя, тумана, ПВ и ХП за 8,5 месяцев составили 178, 141, 260 и 5649 ч. При рассматриваемой плотности тока иней и роса на проводах не образуются.

Используя эти продолжительности, а также данные из статьи [5] и методику из работы [6], годовое снижение потерь электроэнергии на проводах с покрытием за счет снижения ПК составляет:

$$\Delta \mathcal{E}_k = \Delta \mathcal{E}_k (t_0 < 0 \text{ °C}) + \Delta \mathcal{E}_k (t > 0 \text{ °C}) = 23,3 \cdot 10^3 \text{ кВт}\cdot\text{ч/км.}$$

Таким образом, дополнительные потери энергии $\Delta \mathcal{E}_n$ за счет снижения потерь на корону при использовании ферромагнитного покрытия уменьшаются в два раза.

Необходимо также отметить, что гололедообразование происходит не по всей длине ВЛ, а только на отдельных ее участках. Эксплуатирующим организациям на основании опыта эксплуатации с учетом орографии местности известны места на ВЛ, наиболее часто подверженные гололедообразованию. Кроме того, АО «НТЦ ФСК ЕЭС» в 2012 г. разработало гололедные карты по всем регионам РФ, выполненные в масштабе, позволяющем учитывать при проектировании особо опасные участки ВЛ по гололедообразованию. Таким образом, обрабатывать ферромагнитным покрытием необходимо только те части ВЛ, которые наиболее подвержены гололедообразованию.

Оценим в процентном отношении дополнительные потери электроэнергии относительно всего объема передаваемой электроэнергии за год на ВЛ 220 кВ длиной 100 км с плотностью тока 0,7 А/мм², на которой провода на участке длиной 25 км обработаны ферромагнитным покрытием.

Дополнительные потери электроэнергии на нагрев покрытия за год с учетом снижения потерь за счет ПК составят:

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{п-к}}^{\text{год}} = (49,2-23,3) \cdot 10^3 \cdot 25 = 647,5 \cdot 10^3 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$$

Анализ почасовых данных оперативно-измерительного комплекса (ОИК) показал, что усредненная за 2010–2011 гг. по ЕЭС нагрузка ВЛ 220 кВ составляет около 60 МВт. Упрощенно, не учитывая форму графика нагрузки, рассмотрим передачу по ВЛ мощности 57,5 МВт при $\cos \varphi = 0,9$, что составляет 46% от натуральной мощности ВЛ. При этом нагрузочный ток ВЛ составит 168 А, а плотность тока 0,7 А/мм². Если принять время работы оборудования электропередачи при этой нагрузке 8500 ч/год, то объем переданной по ВЛ за год электроэнергии составит:

$$\mathcal{E}^{\text{год}} = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 168 \cdot 8500 = 543,5 \cdot 10^6 \text{ кВт}\cdot\text{ч.}$$

Тогда дополнительные потери электроэнергии относительно переданной электроэнергии за год составят:

$$\frac{\Delta \mathcal{E}_{\text{п-к}}^{\text{год}}}{\mathcal{E}^{\text{год}}} = \frac{647,5 \cdot 10^5}{543,5 \cdot 10^6} = 0,119 \%$$

ВЫВОДЫ

1. Целесообразность применения расширенных проводов должна быть учтена при проектировании новых ВЛ и модернизации существующих.

2. Проведенные исследования показали целесообразность применения проводов с ферромагнитным покрытием с низкой точкой Кюри в гололедоопасных районах.
3. Использование проводов нового поколения требует экспериментальной оценки возникновения коронного разряда на их поверхности в лабораторных условиях и в эксплуатации.
4. Ввод в действие НТД «Руководящих указаний по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 220–1150 кВ и постоянного тока 1500 кВ» позволит проектным и эксплуатирующим организациям правильно оценивать уровни ПК на ВЛ в реальных условиях плотностей токов ВЛ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Larsson P. Measurements of corona losses due to hoar frost and winter precipitation lines in Finland with special reference to estimation of hoar frost corona losses based on meteorological data // Paper № 409, CIGRE, 1964.
2. 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.
3. Kohno H., Isozaki M., Asano Y. Development of the Snow-melting Ring (LC ring) // IWALS XII. Yokohama, October 2007.
4. Leblond A., Sugawara N., Asano Y., Isozaki M. New results on the anti-icing performance of Ic-spiral rods // The 14th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Chongqing, China, May 8–13, 2011.
5. Костюшко В.А. Расчет потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока различных классов напряжения // Энергия единой сети. 2016. № 26.
6. Костюшко В.А. Анализ расчетных и экспериментальных оценок потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока. М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011.