

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В ЗАЩИЩЕННЫХ И НЕИЗОЛИРОВАННЫХ ПРОВОДАХ В СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ С УЧЕТОМ ПОГОДНЫХ УСЛОВИЙ

В воздушных линиях систем электроснабжения на напряжения 6–110 кВ все большую популярность приобретает использование защищенных проводов, которые обладают целым рядом преимуществ перед традиционными неизолированными алюминиевыми проводами. С другой стороны, наличие изоляции требует разработки более сложных математических моделей для адекватного описания их поведения и исследования характеристик новых проводов при эксплуатации.

Приведены результаты использования разработанных математических моделей и программ расчета для сравнительного анализа защищенных и неизолированных проводов в условиях изменения токов нагрузки и погодных условий. Исследованы зависимости температуры и потери активной мощности от толщины изоляции. Показано, что наличие изоляции позволяет при определенных условиях уменьшить температуру и потери по сравнению с проводами без изоляции при прочих равных условиях.

Полученные результаты могут быть использованы для повышения пропускной способности и надежности линий электропередач.

Ключевые слова: потери активной мощности, температура проводника, изолированный провод, защищенный провод, активная мощность, воздушные линии, сопротивление линии.

Введение. Рост численности населения, значительные темпы развития отраслей промышленности, связанных с использованием электроэнергии, обуславливают постоянный рост потребления электрической энергии. Согласно различным сценариям развития энергетики (Net Zero, Accelerated, New Momentum), доля электроэнергии к 2050 году в общем потреблении энергии увеличится в 1,9–2,4 раза по сравнению со значением в 2019 году [1]. Прогнозируемый спрос на электрическую энергию будет ежегодно возрастать на 1,7–5 % до 2050 года [1]. Естественно, будет расти и мощность, передаваемая по воздушным линиям (ВЛ) электропередачи. В связи с увеличением выработки электроэнергии возникает необходимость в увеличении пропускной способности линий электропередач для надежной и безопасной эксплуатации [2]. Существует несколько методов увеличения пропускной способности линии: повышение уровня рабочего напряжения, увеличение количества цепей, использование специальных проводников и уточненный расчет допустимой мощности [3–6]. Одним из вариантов до-

стижения указанной цели является усиление сети за счет строительства новых линий электропередачи или реконструкции уже существующих. Однако реализация указанного направления требует существенных затрат, средств и времени. Наиболее часто строительство новых линий ограничено в связи с отсутствием свободных территорий.

Пропускная способность линий электропередачи зависит от площади поперечного сечения провода. Площадь возможно увеличить за счет добавления дополнительного провода на фазу. Данный вариант негативен тем, что увеличивается нагрузка на существующую опору линий электропередач, подвесного и соединительного оборудования. Возможно увеличение провисания провода и превышение показателей безопасной высоты. Таким образом, установка дополнительного провода требует увеличения затрат, так как необходима замена существующих опор и подвесного оборудования. Сроки окупаемости для подобных значительных затрат за приемлемое время весьма сомнительно. Поэтому на практике акцент делается на полное ис-

пользование возможностей существующих линий электропередач.

Реальной альтернативой строительству новых линий электропередачи в вышеуказанных условиях может быть использование погодных условий для уточнения пропускной способности сети в режимах эксплуатации близких к номинальным.

На пропускную способность и температуру провода существенное воздействие оказывают такие погодные условия, как температура окружающей среды, скорость и направление ветра, солнечная радиация. На температуру проводов может также влиять уровень загрязнения окружающей среды, старение проводов и др.

Традиционно для прогнозирования пропускной способности воздушных линий используются заранее заданные значения консервативного набора метеоусловий. Такой подход получил определение как метод статического расчета (SLR). Дальнейшее развитие расчетов с учетом погодных условий связано с динамическим методом расчета (DLR) — метод динамического рейтинга линий электропередач. Указанный метод позволяет учитывать реальные метеоусловия для нахождения пропускной способности электрических сетей. Практика использования метода DLR показала возможность значительного увеличения пропускной способности в режиме реального времени и реальных метеоусловий.

Созданные методы DLR можно условно разделить на две группы, которые объединяют косвенные методы и прямые методы. В прямых методах информация о характеристиках линий электропередачи (температура провода, натяжение и провисание провода) определяют с помощью датчиков непосредственного мониторинга.

Конкретные рекомендации по учету погодных условий для улучшения пропускной способности приведены в стандарте IEEE Std. 738 [7] и стандарте CIGRE 601 [8].

При сравнении стандартов IEEE и CIGRE можно отметить незначительное отличие в методах расчета в первую очередь солнечной радиации и конвективных потерь. Различия в расчетах, по стандартам, в экстремальных случаях может достигать 5–15%. Вместе с тем в работах по использованию методов IEEE и CIGRE утверждается, что результаты расчетов по указанным методам могут быть достаточно точными по сравнению с экспериментальными значениями. В ряде работ также отмечается, что математический аппарат CIGRE в большинстве случаев более точный, чем в методе IEEE.

Стандарты IEEE и CIGRE включают рекомендации по учету метеоусловий при определении пропускной способности электрических сетей. В стандартах содержится соотношение, связывающее электрические и тепловые параметры линий электропередач. Уравнение теплового баланса из IEEE в установившемся режиме совместно с уравнениями тепловых параметров успешно используется для определения пропускной способности с учетом погодных условий, а также с учетом геометрических и физических характеристик воздушных линий электропередачи.

В методе SLR для расчета пропускной способности воздушных линий применяются консервативные значения погодных условий: температура окружающей среды — 40 °С, скорость ветра — 0,6 м/с, солнце — яркое.

Таким образом, метод статического расчета SLR используется для определения пропускной способ-

ности в наихудших условиях, в то время как реальные погодные факторы могут обеспечить передачу более высоких значений электрической мощности и тока. Определение пропускной способности на базе метода SLR, который обеспечивает минимальные значения пропускной способности, ограничивает реальные возможности существующих линий, с одной стороны, и приводит к пустой трате ресурсов на строительство новых линий — с другой.

Ввиду того, что в различные сезоны года указанные значения могут быть слишком консервативными, в ряде случаев используется разновидность метода SLR, базирующаяся на сезонном статическом определении пропускной способности (S-SLR). В рамках обозначенной разновидности S-SLR для исследования пропускной способности применение находят соответствующие сезону совокупности заранее выбранных значений погодных условий отдельно для лета и отдельно для зимы. Указанные две совокупности погодных условий определяют два различных значения допустимого тока в линии. Представляется, что указанная разновидность S-SLR может считаться улучшенным вариантом подхода SLR. Однако учет изменений погодных условий в реальном времени в методе S-SLR не реализуется. Другим важным ограничением подхода S-SLR является то, что такие важные параметры, как направление и скорость ветра считаются одинаковыми для лета и зимы.

Особенности защищенных проводов. Важным направлением повышения пропускной способности воздушных линий электропередачи является применение при их строительстве и эксплуатации защищенных изоляцией проводов [7]. Внедряемые новые провода являются прогрессивной альтернативой традиционным алюминиевым неизолированным проводам.

Неизолированные провода широко применяются на воздушных линиях распределительных сетей России 6–35 кВ. К недостаткам воздушных линий с неизолированными проводами напряжением 6–35 кВ следует отнести:

- 1) недостающий уровень надежности;
- 2) высокий уровень потерь электроэнергии;
- 3) зачастую неполное выполнение требований по качеству электроэнергии;
- 4) увеличенное количество электрических сетей, отработавших нормативный срок.

Уменьшению негативного влияния указанных недостатков способствует внедрение воздушных линий с самонесущими и защищенными проводами (ВЛЗ) [9–11]. Основными типами защищенных проводов являются СИП-3 (6–35 кВ), ПЗВ (35 кВ), ПЗВГ (35 кВ), СИП-7 (110 кВ).

Согласно названию, защищенный провод представляет конструкцию, выполненную из проводника, покрытого слоем светостабилизированного сшитого полиэтилена. Оболочка из сшитого полиэтилена обладает рядом положительных свойств. Наиболее полезным качеством является стабильность механических изоляционных и химических свойств при изменении температуры в широком диапазоне. Характеристики сшитого полиэтилена позволяют эксплуатировать защищенные провода в течение длительного времени при температуре 90 °С. Значение допустимой температуры определяется величиной допустимого тока нагрузки, протекающего по защищенным проводам при температуре окружающей среды +25 °С. Допустимые токи

Значения токовых нагрузок защищенных проводов

Номинальное сечение основных жил, мм ²	Допустимый ток короткого замыкания, кА		Допустимый ток нагрузки не более, А		
	До 1 кВ	До 35 кВ	До 1 кВ	Защищенные провода	
				До 20 кВ	До 35 кВ
240	22,0	20,6	515	600	670
185	16,5	15,9	436	560	600
150	13,2	12,9	380	485	520
120	10,9	10,3	340	430	460
95	8,8	8,2	300	370	400
70	6,5	6,0	240	310	340
50	4,6	4,3	195	245	270
35	3,2	3,0	160	200	220
25	2,3	–	130	–	–
16	1,5	–	100	–	–

покрытых изоляцией проводов для различных сечений и напряжений показаны в табл. 1.

К преимуществам использования СИП-3 следует отнести:

1) на поверхности провода практически не образуется гололед и мокрый снег. Мокрый снег достаточно легко стекает с гладкой поверхности защищенного провода. В неизолированных проводах марок А и АС снег может удерживаться в углублениях между проволоками и обеспечивает дальнейшее обрастание;

2) значительное уменьшение габаритов воздушных защищенных линий (ВЛЗ) по сравнению с ВЛ с неизолированными проводами;

3) стоимость ВЛЗ с СИП-3 ориентировочно на 35 % выше линий с неизолированными проводами, однако снижение эксплуатационных расходов у ВЛЗ может достигать 80 %. Сокращение эксплуатационных расходов обусловлено исключением систематической расчистки трасс, заменой поврежденных изоляторов, уменьшением аварийно-восстановительных работ;

4) уменьшение сроков монтажа из-за простоты работ;

5) сокращение сроков ремонта за счет возможности работ под напряжением без отключения потребителей от электроснабжения;

6) высокая механическая прочность делает маловероятной возможность обрыва ВЛЗ;

7) практическое исключение междуфазных коротких замыканий и замыканий на землю при схлестывании проводов или падении на линию дерева. При падении провода на землю ВЛЗ выдерживает рабочее напряжение, и линия может продолжать работу;

8) за счет уменьшения междуфазного расстояния уменьшается реактивное сопротивление и, как следствие, уменьшаются потери электрической энергии, а также уменьшается падение напряжения на ВЛЗ;

9) улучшение пожаробезопасности ВЛЗ, основанное на уменьшении возможности короткого замыкания при схлестывании, падении на землю, падении веток, попаданию посторонних предметов;

10) возможность использования более низких опор уменьшает вероятность попадания молнии и не требует мощной спецтехники при монтаже;

11) повышенная надежность особенно в зонах интенсивного гололедаобразования.

При реконструкции и строительстве новых воздушных линий электропередачи целесообразен переход на более высокие классы среднего напряжения. Особенности защищенных проводов СИП-3 заключаются в возможности уменьшения межфазного расстояния, что облегчает переход современных электрических сетей 6–10 кВ на более высокое напряжение.

Переход с 10 кВ на 20 кВ или 35 кВ, с 6 кВ на 10 кВ обеспечивает решение очень важной задачи — уменьшение потерь электрической энергии при её передаче. Более того, технические характеристики СИП-3 дают возможность реализации воздушных линий 35 кВ в габаритах воздушных линий 10 кВ. Особенности ВЛЗ позволяют перейти на штыревую изоляцию вместо подвесной и, как следствие, способствует уменьшению высоты опор ВЛЗ 35 кВ до габаритов воздушных линий на напряжение 10 кВ. Указанная операция перехода на более высокие классы напряжения обеспечивает передачу в 2,5 раза большей мощности при одновременном сокращении потерь.

Отмеченные преимущества защищенных проводов делают весьма привлекательным их использование по целому ряду направлений. Однако с возрастанием сроков эксплуатации и увеличением протяженности возникают вопросы негативного характера [12]. Они касаются процессов старения изоляции и возникновения в ней дефектов при воздействии климатических нагрузок. Особенно остро стоит проблема их защиты от грозových перенапряжений при ударе молнии.

Присутствие изоляции определяет и необходимость разработки более сложных математических моделей, удобных при проектировании и эксплуатации воздушных линий [13].

К недостаткам применения защищенных проводов следует также отнести более высокую их стоимость.

Результаты исследования. Разработанные модели и программы [14–16] использовались для изучения воздействия размеров изоляционной оболочки СИП-3 сечением 50 мм² для напряжения 20 кВ и температуры воздуха +25 °С (табл. 2).

Таблица 2

Параметры изучаемого провода

Сравнительная характеристика	СИП-3 1×50-20
Поперечное сечение проводящей жилы, мм ²	50
Минимальная температура для прокладки провода без разогрева, °С	-20
Номинальная толщина изоляционного слоя при напряжении 20 кВ, мм	2,3
Номинальная толщина изоляционного слоя при напряжении 35 кВ, мм	3,5
Активное сопротивление жилы при 20°С, Ом/км	0,72
Срок службы не менее, лет	40
Гарантийный срок эксплуатации, лет	3
Длительно допустимая температура проводящей жилы, °С	+90
Температура проводящей жилы в режиме перегрузки, °С	+130
Предельная температура проводящей жилы при коротком замыкании, °С	250
Допустимая температура окружающей среды, °С	от -60 до +50
Масса провода, кг/км	239
Разрывное усилие провода, Н	14200
Номинальное переменное напряжение, кВ	20/30
Количество жил, шт.	1
Номинальная частота, Гц	50
Активное сопротивление жилы при 90°С, Ом/км	0,92
Длительно допустимая токовая нагрузка при напряжении 20 кВ, А	245
Длительно допустимая токовая нагрузка при напряжении 35 кВ, А	270
Допустимый ток КЗ продолжительностью 1 сек, кА	4,3
Минимально допустимый радиус изгиба, мм	160

Программы обеспечивают возможность легко вводить требуемые величины для проведения исследований. После ввода всей информации программа приступает к выполнению необходимых расчетов и отображает результаты на экране.

В табл. 1 для изолированных проводов указаны рабочие напряжения 20 и 35 кВ. В практике эксплуатации защищенных проводов отмечаются и другие напряжения (до 1, 6, 10, 110 кВ). С увеличением напряжения растет толщина изоляции: для напряжения до 20 кВ номинальное значение толщины изоляции составляет 2,3 мм, для напряжения 35 кВ — 3,5 мм. Однако несовершенство технологии производства проводов реально обеспечивает или обуславливает разброс толщины изоляции проводов для напряжения 20 кВ в диапазоне 2,06–2,58 мм [17]. Для изолированных проводов СИП-3 1х50 отечественного производства на 20 кВ минимальная толщина изоляции составляет 1,97 мм [9]. Интересным представляется факт увеличения значения допустимого тока в проводах с увеличением напряжения. Так, для сечения 50 мм² допустимый

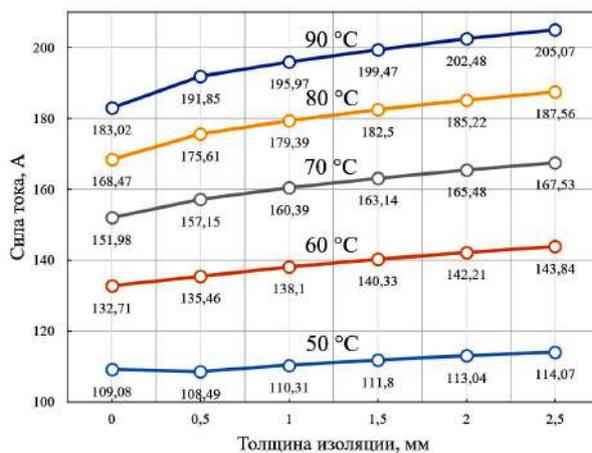


Рис. 1. График зависимости силы тока от толщины изоляции провода СИП-3 1×50-20 при температуре жилы провода 50, 60, 70, 80, 90 °С

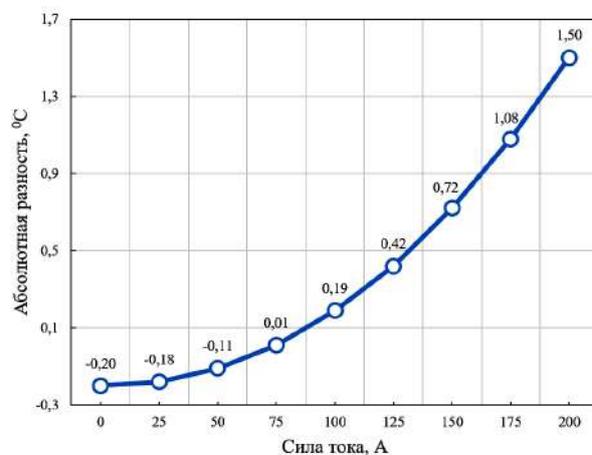


Рис. 2. График зависимости абсолютной разности температуры при толщине изоляции 2 мм ($d_{пр} = 11,85$ мм) и 2,5 мм ($d_{пр} = 12,85$ мм) провода СИП-3 1×50-20

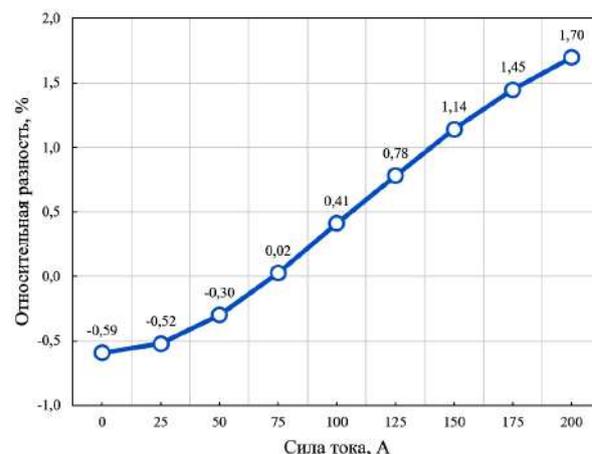


Рис. 3. График зависимости относительной разности температуры при толщине изоляции 2 мм ($d_{пр} = 11,85$ мм) и 2,5 мм ($d_{пр} = 12,85$ мм) провода СИП-3 1×50-20

ток равен 245 А при напряжении 20 кВ, а для напряжения 35 кВ — 270 А.

Созданное математическое и программное обеспечение дает возможность исследовать влияние

Моделирование температуры СИП-3 1×50-20 при вариации толщины изоляции

I, A	$\theta_{np} (d_{np}=11,85 \text{ мм}), ^\circ C$	$\theta_{np} (d_{np}=12,85 \text{ мм}), ^\circ C$	Абсолютная разность $\theta_{np} (d_{np}=11,85 \text{ мм}) - \theta_{np} (d_{np}=12,85 \text{ мм}), ^\circ C$	Относительная разность $(\theta_{np} (d_{np}=11,85 \text{ мм}) - \theta_{np} (d_{np}=12,85 \text{ мм})) / \theta_{np} (d_{np}=11,85 \text{ мм}) \cdot 100\%$
0	33,79	33,99	-0,20	-0,59
25	34,55	34,73	-0,18	-0,52
50	36,86	36,97	-0,11	-0,30
75	40,77	40,76	0,01	0,02
100	46,37	46,18	0,19	0,41
125	53,77	53,35	0,42	0,78
150	63,13	62,41	0,72	1,14
175	74,63	73,55	1,08	1,45
200	88,48	86,98	1,50	1,70

Таблица 4

Условия расчета

Наименование и обозначение параметров	АС-120/27	СИП-3 1x120-20
Погонное сопротивление провода при 20 °С, ом/км	0,25	0,29
Диаметр жилы провода d_1 , мм	15,4	13,1
Внешний диаметр провода d_2 , мм	—	17,5
Коэффициент теплопроводности изоляции, λ Вт/(м·°С)	—	0,4
Температурный коэффициент сопротивления α , °С ⁻¹	0,00403	
Степень черноты поверхности провода ε	0,6	0,8
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,6	0,9
Температура воздуха $t_{в'}$, °С	5	
Атмосферное давление $P_{атм'}$ кПа	100	
Скорость ветра v , м/с	1	
Коэффициент угла атаки ветра k_v	0,5	
Угол между солнечным излучением и осью провода, °	45	
Коэффициент затененности	0,7	
Плотность потока прямой солнечной радиации на поверхность, перпендикулярную солнечным лучам $q_{s,пр'}$ Вт/м ²	500	
Плотность потока рассеянной солнечной радиации $q_{s,расс'}$ Вт/м ²	100	
Длина линии, км	1	

толщины изоляционной оболочки на температуру изолированных проводов при фиксированных значениях интенсивности солнечной радиации, протекающего тока, скорости ветра при температуре окружающей среды +25 °С.

Результаты исследования для провода СИП-3 с сечением 50 мм² на 20 кВ изображены на рис. 1 – 3 и в табл. 3. За счет различной толщины изоляции в эксперименте меняется внешний диаметр провода от 7,85 до 12,85 мм. Следует отметить, что температура и потери в проводах с большей толщиной изоляции в области допустимых токов меньше, чем для начальных значений тока.

Разработанные программы [14, 15] использовались и для сравнительного анализа неизолированного провода АС-120/27 и защищенного провода СИП-3 1×120-20. Исходные данные для расчетов отражены в табл. 4. Указанная в табл. 4 величина скорости ветра 1 м/с превышает минимальную, кото-

рая по различным оценкам варьируется в пределах от 0,2 до 0,6 м/с. Расчеты ведутся в предположении использования разработанного математического аппарата при численном моделировании, основанном на вынужденной конвекции.

При сравнении использовались следующие соотношения:

$$\varepsilon_{11} = (t_{СИП} - t_{АС}) / t_{СИП} \quad (1)$$

$$\varepsilon_{P1} = (P_{СИП} - P_{АС}) / P_{СИП} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{t2} = (t_{СИП} - t'_{СИП}) / t'_{СИП} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{P2} = (P_{СИП} - P'_{СИП}) / P'_{СИП} \quad (4)$$

$$\varepsilon_{t3} = (t'_{СИП} - t_{АС'}) / t_{АС'} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{P3} = (P'_{СИП} - P_{АС'}) / P_{АС'} \quad (6)$$

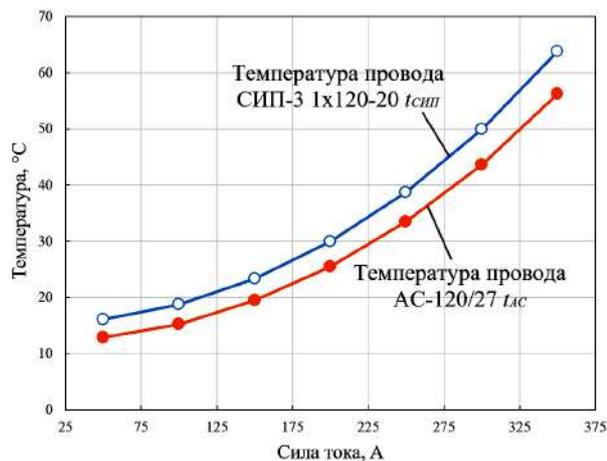


Рис. 4. Распределение температуры защищенного $t_{СИП}$ и неизолированного $t_{АС}$ провода при вариации силы тока

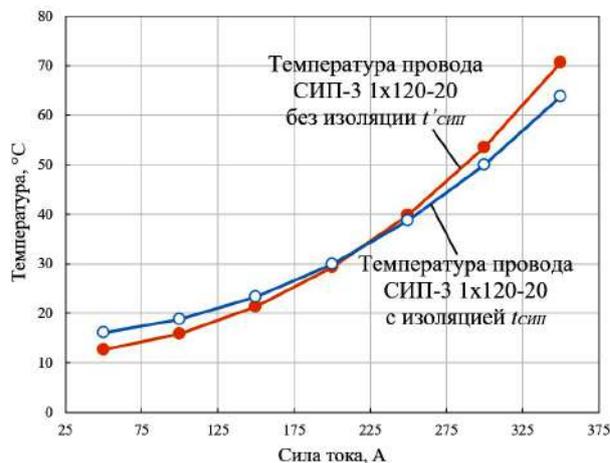


Рис. 7. Значения температуры СИП-3 1x120-20 с изоляцией $t_{СИП}$ и СИП-3 1x120-20 со снятой изоляцией $t'_{СИП}$ при вариации силы тока

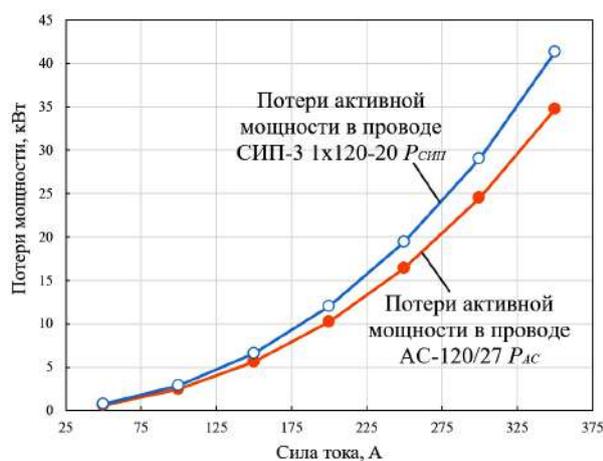


Рис. 5. Потери активной мощности в защищенном $P_{СИП}$ и неизолированном $P_{АС}$ проводе при вариации силы тока

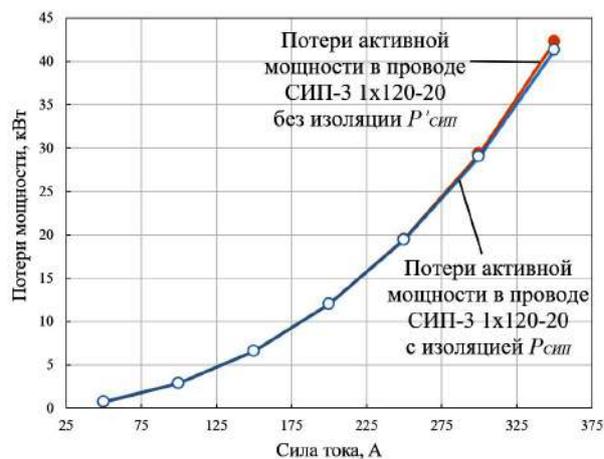


Рис. 8. Потери активной мощности СИП-3 1x120-20 с изоляцией $P_{СИП}$ и СИП-3 1x120-20 со снятой изоляцией $P'_{СИП}$ при вариации силы тока

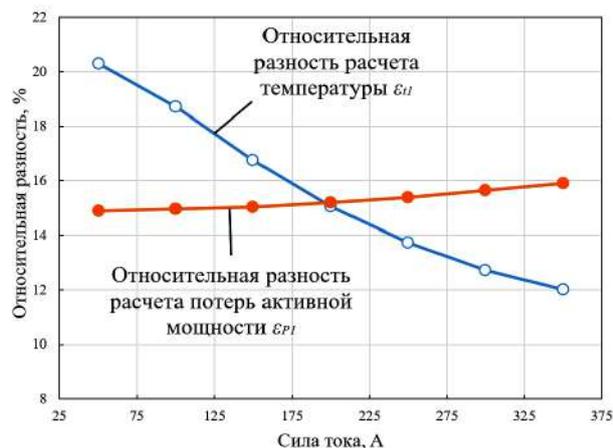


Рис. 6. Значения ϵ_t и ϵ_{P1} для СИП-3 1x120-20 и АС-120/27

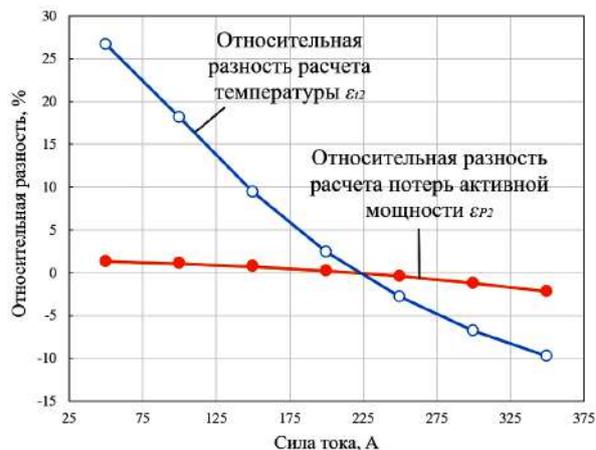


Рис. 9. Значения ϵ_{t2} и ϵ_{P2} для СИП-3 1x120-20 с изоляцией и СИП-3 1x120-20 со снятой изоляцией

где ϵ_{t1} , ϵ_{t2} и ϵ_{t3} — относительная разность расчета температуры; ϵ_{P1} , ϵ_{P2} и ϵ_{P3} — относительная разность расчета потерь активной мощности; $t_{АС}$ — температура проводника АС-120/27; $t_{СИП}$ и $t'_{СИП}$ — температура проводника СИП-3 1x120-20 с изоляцией и без изоляции; $P_{АС}$ — потери активной мощности в проводе АС-120/27; $P_{СИП}$ и $P'_{СИП}$ — потери актив-

ной мощности в СИП-3 1x120-20 с изоляцией и без изоляции.

Результаты моделирования представлены на рис. 4–12. Анализ рис. 4–5 показывает, что при одинаковом токе нагрузки значения потерь активной мощности и температуры в защищенном проводе несколько выше, чем в проводе АС-120/27.

Таблица 5

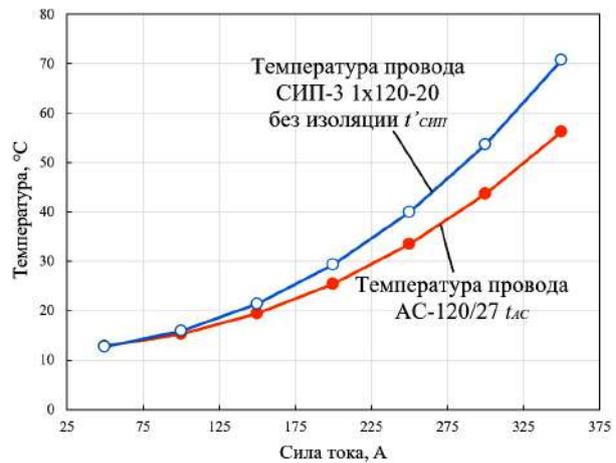
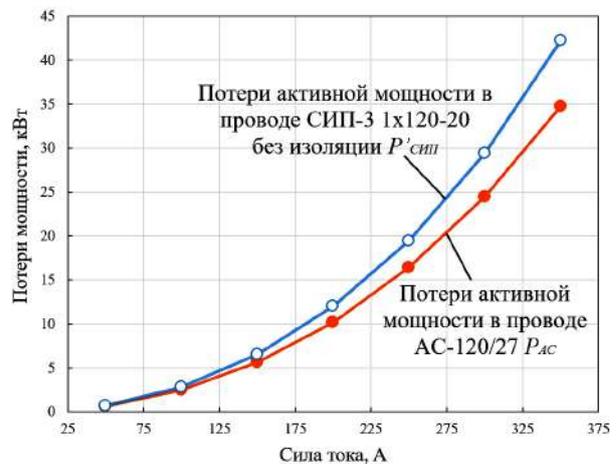
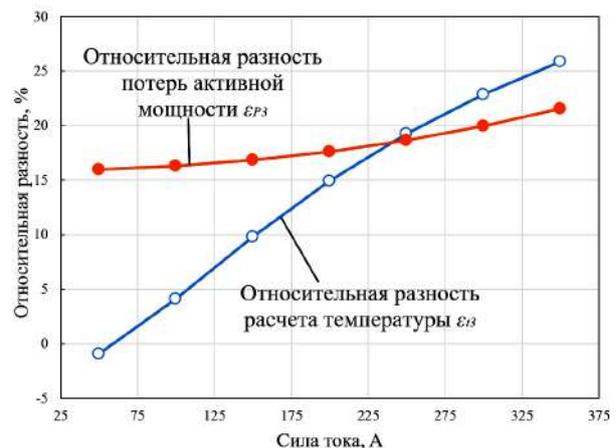
Отличия защищенного провода СИП-3 1×120-20 и провода СИП-3 1×120-20 со снятой изоляцией

Тип провода Наименование параметра	СИП-3 1×120-20 с изоляцией	СИП-3 1×120-20 со снятой изоляцией
Внешний диаметр провода, мм	17,5	13,1
Степень черноты поверхности провода ϵ	0,8	токопроводящая жила 0,6
Поглощательная способность поверхности провода для солнечного излучения A_s	0,9	токопроводящая жила 0,6

Полученный результат отражает отличие удельных сопротивлений проводов АС-120/27 и СИП-3 1×120-20. Материал токопроводящей жилы защищенного провода имеет более высокое удельное сопротивление. Отметим особенности превышения по потерям активной мощности и по температуре (рис. 4–5). В относительных единицах при увеличении тока различия по потерям активной мощности незначительно возрастают ориентировочно с 15 % до 16 % (рис. 6). Характер изменения различий по температуре другой. При увеличении тока различия по температуре монотонно убывают с 20 % до 12 %. Зависимость по температуре (рис. 6) можно объяснить со следующих позиций. Абсолютные разности значений температуры $t_{СИП} - t_{АС}$ при возрастании нагрузки практически не меняются (рис. 4). В то же время при росте тока температура $t_{АС}$ постоянно растет (рис. 4). Следовательно, согласно уравнению (1), величина ϵ_{11} уменьшается при увеличении нагрузки (рис. 6). Проведенное аналогичное сравнительное исследование проводов АС-50 и SАХ-50 показывают похожие по форме графики [18]. Можно отметить лишь незначительное количественное отличие. В этом случае различия по потерям возрастают с 18 % до 20 % (для сечения 120 мм², как следует из предыдущего текста, изменение было с 15 % до 16 %). Различия по температуре монотонно убывает с 28 % до 11 % (для сечения 120 мм² изменение было с 20 % до 12 %).

Представляется, что незначительное возрастание величины потерь активной мощности ϵ_{P1} в проводах СИП-3 1×120-20 и АС-120/27 (рис. 7) возможно объяснить температурной зависимостью сопротивлений проводов. При росте нагрузки увеличивается сопротивление проводов. Кроме того, разница сопротивлений проводов СИП-3 1×120-20 и АС-120/27, а следовательно, и разница значений активной мощности не остаются постоянными. Они также увеличиваются и при росте тока.

В целом погодные условия влияют на температуру и потери активной мощности в проводах по двум каналам: через температуру воздуха и через коэффициент теплоотдачи. Температура воздуха определяет исходный уровень температуры провода, относительно которого происходит нагрев током. Таким образом, изменение температуры воздуха приводит примерно к такому же изменению температуры провода. Коэффициент теплоотдачи зависит в большей степени не от температуры воздуха, а от скорости и направления ветра. Его изменение влияет на разность температур провода и воздуха при заданном токе.

Рис. 10. Значения температуры АС-120/27 $t_{АС}$ и СИП-3 1×120-20 со снятой изоляцией $t'_{СИП}$ при вариации силы токаРис. 11. Потери активной мощности АС-120/27 $P_{АС}$ и СИП-3 1×120-20 со снятой изоляцией $P'_{СИП}$ при вариации силы токаРис. 12. Значения ϵ_{P3} и ϵ_{t3} для АС-120/27 и СИП-3 1×120-20 со снятой изоляцией

Особый интерес представляет изучение влияния изоляции на температуру и потери активной мощности в проводах воздушных линий. На рис. 7–9 построена зависимость на основе проведенного исследования в указанном направлении. На рис. 7–9 приведены графики изменения температуры и потерь активной мощности для защищенного прово-

да СИП-3 1×120-20 с изоляцией и провода СИП-3 1×120-20 с удаленной изоляцией при прочих равных условиях для проводов при проведении численного эксперимента. Отличия указанных типов проводов представлены в табл. 5.

Для малых значений тока наблюдается превышение температуры СИП-3 1×120-20 относительно температуры провода СИП-3 1×120-20 со снятой изоляцией. При дальнейшем возрастании тока (рис. 7) отмечается более высокая температура в проводе СИП-3 1×120-20 без изоляции. Более четко указанная тенденция представлена на рис. 9.

Соотношения по потерям активной мощности (рис. 8–9) аналогичны соотношениям по температуре, но представлены менее ярко, чем по температуре.

На рис. 10–12 представлены результаты моделирования для сравнения потерь активной мощности и температуры в проводе АС-120/27 и в проводе СИП-3 1×120-20 с удаленной изоляцией. Приведенные зависимости указывают на превышение потерь активной мощности и температуры в проводе СИП-3 1×120-20 во всем диапазоне изменения тока. В этом проявляется сходство на рис. 4 и рис. 5. Следует также отметить одинаковое изменение графиков по потерям активной мощности на рис. 6 и рис. 12. Максимальные значения по потерям активной мощности равны 22 % (рис. 12) и 16 % (рис. 6).

Анализ эксперимента позволяет заключить, что при определенных значениях тока в проводе с изоляцией наблюдаются меньшие потери и меньшие температуры, чем в том же самом проводе со снятой изоляцией. Физическая причина этого состоит в том, что слой изоляции способствует лучшему отведению тепла от провода, чем воздух, так как передача тепла через изоляцию путем теплопроводности близка к передаче тепла от провода в воздух путем конвекции, но степень черноты изоляции выше, чем у неизолированного провода, поэтому лучистый теплообмен становится интенсивнее и провод охлаждается более эффективно. Поскольку интенсивность лучистого теплообмена пропорциональна разности четвертых степеней абсолютных температур провода и окружающей среды [16], то чем выше температура провода, тем сильнее становится влияние лучистого теплообмена на охлаждение провода, что приводит к росту разности температур изолированного и неизолированного провода с увеличением тока.

Таким образом, покрыв провод изоляцией можно при определенных значениях тока добиться уменьшения температуры и потери активной мощности по сравнению с неизолированным проводом того же сечения при прочих равных условиях.

Проведенные исследования показывают, что учет температуры окружающей среды, скорости и направления ветра, интенсивности солнечной радиации позволяют более детально исследовать температуру и потери электрической энергии защищенных и неизолированных проводов. Значения последних чрезвычайно важны для решения актуальной проблемы прогнозирования пропускной способности воздушных линий электропередачи.

Библиографический список

1. Energy Outlook 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (дата обращения: 08.02.2024).
2. Martinez R., Manana M., Arroyo A. [et al.]. Dynamic Rating Management of Overhead Transmission Lines Operating under Multiple Weather Conditions // *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 59–63. DOI: 10.3390/en14041136.
3. Riba J., Bogarra S., Gyme-Pau B. [et al.]. Uprating of transmission lines by means of HTLS conductors for a sustainable growth: Challenges, opportunities, and research needs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 134. P. 110334. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110334.
4. Nor S. F. M., Ab Kadir M. Z. A., Mohd Ariffin A. [et al.]. Systematic Approaches and Analyses on Voltage Uprating of 132 kV Transmission Lines: A Case Study in Malaysia // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 19. P. 9087. DOI: 10.3390/app11199087.
5. Qiao K., Zhu A., Wang B. [et al.]. Characteristics of Heat Resistant Aluminum Alloy Composite Core Conductor Used in overhead Power Transmission Lines // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13, no. 7. P. 1592. DOI: 10.3390/ma13071592.
6. Rahman M., Atchison F., Cecchi V. Temperature-dependent system level analysis of electric power transmission systems: A review // *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 193. P. 107033. DOI: 10.1016/j.epr.2021.107033.
7. IEEE Std. 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-2006 – Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013). Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE, 2012. 72 p.
8. Guide for thermal rating calculations of overhead lines / Working group B2.43. CIGRE, 2014. 95 p.
9. ГОСТ 31946–2012. Провода самонесущие изолированные и защищенные для воздушных линий электропередачи. Общие технические условия. Введ. 12–03–2012. Москва: Стандартинформ, 2013. 20 с.
10. Dumarevskaya L., Parent J. Electric grid resilience: The effects of conductor coverings, enhanced tree trimming, and line characteristics on tree-related power outages // *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 221. P. 109454. DOI: 10.1016/j.epr.2023.109454.
11. Nourizadeh H., Ghadiri M., Bashiri H. [et al.]. Insulation Life Estimation of Low Voltage Self-Supporting XLPE Cables Installed in Electric Power Distribution Network of Ilam Province, Iran: A Case Study in Ilam Province Electric Power Distribution Company // *27th International Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*. 2023. P. 147–152. DOI: 10.1109/EPDC59105.2023.10218795.
12. Вихарев А. П., Вильнер А. В., Репкина Н. Г. Потери мощности и падение напряжения в воздушных ЛЭП с защищенными проводами // *Advanced Science*. 2017. № 2 (6). С. 18. EDN: ZJRVYX.
13. Петрова Е. В. Оценка влияния солнечной радиации на нагрузочные потери активной мощности в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах линий электропередачи // *Известия Транссиба*. 2019. № 3 (39). С. 134–145. EDN: NWPBUX.
14. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Криволапов В. А., Жиленко Е. П., Горюнов В. Н. Расчет длительно допустимых токов и потерь активной мощности в изолированных и неизолированных проводах воздушных линий электроэнергетических систем с учетом климатических факторов: программа для ЭВМ. Москва: ФИПС, 2023. № 2023660295.
15. Петрова Е. В. Определение потерь электрической энергии и допустимых значений тока в высокотемпературных и самонесущих изолированных проводах воздушных линий с учетом погодных изменений: программа для ЭВМ. Москва: ФИПС, 2019. № 2019660200.
16. Петрова Е. В., Гиршин С. С., Криволапов В. А., Горюнов В. Н., Троценко В. М. Анализ длительно допустимых токов и потерь активной мощности в воздушных линиях электропередачи с учетом климатических факторов // *Омский научный вестник*. 2023. № 4 (188). С. 84–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92. EDN: WQGZWB.

17. Kiitam I., Taklaja P., Tuttelberg K. Voltage withstand properties of the insulation of different types of medium voltage covered overhead line conductors // 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/EPE.2018.8396011.

18. Гиршин С. С., Горюнов В. Н., Бигун А. Я., Петрова Е. В., Кузнецов Е. А., Бубенчиков А. А. Сравнительный анализ изолированных и неизолированных проводов воздушных линий при вариации токов нагрузки с учетом метеоусловий // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. Т. 3, № 1. С. 67–76. EDN: XBFJKV.

ПЕТРОВА Елена Владимировна, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 2750-7350

AuthorID (РИНЦ): 685250

Адрес для переписки: evpetrova2000@yandex.ru

ГИРШИН Станислав Сергеевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1125-1521

AuthorID (РИНЦ): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

КРИВОЛАПОВ Владислав Александрович, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

Адрес для переписки: KrivolapovVladislav1998@gmail.com

ХАЦЕВСКИЙ Константин Владимирович, доктор технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры «Электрическая техника» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7219-6033

AuthorID (РИНЦ): 465857

ORCID: 0000-0001-9504-1312

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

Адрес для переписки: xkv-post@rambler.ru

ГОРЮНОВ Владимир Николаевич, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 2765-2945

AuthorID (РИНЦ): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Адрес для переписки: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

ТРОЦЕНКО Владислав Михайлович, старший преподаватель кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3958-5882

AuthorID (РИНЦ): 889516

Для цитирования

Петрова Е. В., Гиршин С. С., Криволапов В. А., Хацевский К. В., Горюнов В. Н., Троценко В. М. Анализ потерь в защищенных и неизолированных проводах в стационарных режимах с учетом погодных условий // Омский научный вестник. 2024. № 3 (191). С. 99–109. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-99-109.

Статья поступила в редакцию 22.02.2023 г.

© Е. В. Петрова, С. С. Гиршин,

В. А. Криволапов, К. В. Хацевский,

В. Н. Горюнов, В. М. Троценко

THE ANALYSIS OF LOSSES IN PROTECTED AND NON-INSULATED WIRES IN STATIONARY MODES, TAKING INTO ACCOUNT WEATHER CONDITIONS

In overhead lines of power supply systems at voltages of 6–110 kV, the use of protected wires is becoming increasingly popular, which have a number of advantages over traditional non-insulated aluminum wires. On the other hand, the presence of insulation requires the development of more complex mathematical models to adequately describe their behavior and study the characteristics of new wires during operation.

The results of using the developed mathematical models and calculation programs for comparative analysis of protected and non-insulated wires under conditions of changing load currents and weather conditions are presented. The dependences of temperature and loss of active power on insulation thickness are investigated. It is shown that the presence of insulation allows, under certain conditions, to reduce temperature and losses compared to wires without insulation, all other things being equal.

The results obtained can be used to increase the capacity and reliability of power transmission lines.

Keywords: active power losses, conductor temperature, insulated wire, protected wire, active power, overhead lines, line resistance.

References

1. Energy Outlook 2022 // bp. URL: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> (accessed: 08.02.2024). (In Engl.).
2. Martinez R., Manana M., Arroyo A. [et al.]. Dynamic Rating Management of Overhead Transmission Lines Operating under Multiple Weather Conditions // *Energies*. 2021. Vol. 14, no. 4. P. 59–63. DOI: 10.3390/en14041136. (In Engl.).
3. Riba J., Bogarra S., Gómez-Pau Á. [et al.]. Uprating of transmission lines by means of HTLS conductors for a sustainable growth: Challenges, opportunities, and research needs // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 134. P. 110334. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110334. (In Engl.).
4. Nor S. F. M., Ab Kadir M. Z. A., Mohd Ariffin A. [et al.]. Systematic Approaches and Analyses on Voltage Uprating of 132 kV Transmission Lines: A Case Study in Malaysia // *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, no. 19. P. 9087. DOI: 10.3390/app11199087. (In Engl.).
5. Qiao K., Zhu A., Wang B. [et al.]. Characteristics of Heat Resistant Aluminum Alloy Composite Core Conductor Used in overhead Power Transmission Lines // *Materials (Basel)*. 2020. Vol. 13, no. 7. P. 1592. DOI: 10.3390/ma13071592. (In Engl.).
6. Rahman M., Atchison F., Cecchi V. Temperature-dependent system level analysis of electric power transmission systems: A review // *Electric Power Systems Research*. 2021. Vol. 193. P. 107033. DOI: 10.1016/j.epsr.2021.107033. (In Engl.).
7. IEEE Std. 738-2012 (Revision of IEEE Std 738-2006 – Incorporates IEEE Std 738-2012 Cor 1-2013). Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors. IEEE, 2012. 72 p. (In Engl.).
8. Guide for thermal rating calculations of overhead lines / Working group B2.43. CIGRE, 2014. 95 p. (In Engl.).
9. GOST 31946–2012. Provoda samonesushchiye izolirovannyye i zashchishchennyye dlya vozdushnykh liniy elektroperedachi. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya [Insulated and protected wires for overhead power lines. General specifications]. Moscow, 2012. 20 p. (In Russ.).
10. Dumarevskaya L., Parent J. Electric grid resilience: The effects of conductor coverings, enhanced tree trimming, and line characteristics on tree-related power outages // *Electric Power Systems Research*. 2023. Vol. 221. P. 109454. DOI: 10.1016/j.epsr.2023.109454. (In Engl.).
11. Nourizadeh H., Ghadiri M., Bashiri H. [et al.]. Insulation Life Estimation of Low Voltage Self-Supporting XLPE Cables Installed in Electric Power Distribution Network of Ilam Province, Iran: A Case Study in Ilam Province Electric Power Distribution

Company // 27th International Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC). 2023. P. 147–152. DOI: 10.1109/EPDC59105.2023.10218795. (In Engl.).

12. Vikharev A. P., Vilner A. V., Repkina N. G. Poteri moshchnosti i padeniye napryazheniya v vozduzhnykh LEP s zashchishchennymi provodami [Power loss and voltage drop in overhead power lines with protected wires] // *Advanced Science. Advanced Science*. 2017. No. 2 (6). P. 18. EDN: ZJRVYX. (In Russ.).

13. Petrova E. V. Otsenka vliyaniya solnechnoy radiatsii na nagruzochnyye poteri aktivnoy moshchnosti v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh liniy elektroperedachi [Assessment of solar radiation effect on real-power losses under load in high-temperature and self-supporting insulated wires of power lines] // *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2019. No. 3 (39). P. 134–145. EDN: NWPBUX. (In Russ.).

14. Petrova E. V., Girshin S. S., Krivolapov V. A., Zhilenko E. P., Goryunov V. N. Raschet dlitel'no dopustimyykh tokov i poter' aktivnoy moshchnosti v izolirovannykh i neizolirovannykh provodakh vozduzhnykh liniy elektroenergeticheskikh sistem s uchedom klimaticheskikh faktorov: programma dlya EVM [Calculation of long-term permissible currents and active power losses in insulated and non-insulated overhead wires of electric power systems, taking into account climatic factors: Computer programme]. Moscow, 2023. No. 2023660295. (In Russ.).

15. Petrova E. V. Opredeleyeniye poter' elektricheskoy energii i dopustimyykh znacheniy toka v vysokotemperaturnykh i samonesushchikh izolirovannykh provodakh vozduzhnykh liniy s uchedom pogodnykh izmeneniy: programma dlya EVM [Determination of power losses and current carrying capacities of high-temperature and self-supporting insulated overhead line conductors, taking weather-related changes into account: Computer programme]. Moscow, 2019. No. 2019660200. (In Russ.).

16. Petrova E. V., Girshin S. S., Krivolapov V. A., Goryunov V. N., Trotsenko V. M. Analiz dlitel'no dopustimyykh tokov i poter' aktivnoy moshchnosti v vozduzhnykh liniyakh elektroperedachi s uchedom klimaticheskikh faktorov [The analysis of continuous admissible currents and active power losses in overhead power lines taking into account climatic factors] // *Omskiy nauchnyy vestnik. Omsk Scientific Bulletin*. 2023. No. 4 (188). P. 84–92. DOI: 10.25206/1813-8225-2023-188-84-92. EDN: WQGZWB. (In Russ.).

17. Kiitam I., Taklaja P., Tuttelberg K. Voltage withstand properties of the insulation of different types of medium voltage covered overhead line conductors // 19th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE). 2018. P. 1–4. DOI: 10.1109/EPE.2018.8396011. (In Engl.).

18. Girshin S. S., Goryunov V. N., Bigun A. Ya., Petrova E. V., Kuznetsov E. A., Bubenchikov A. A. Sravnitel'nyy analiz izolirovannykh i neizolirovannykh provodov vozduzhnykh liniy pri variatsii tokov nagruzki s uchedom meteoulovoy [Comparative analysis of insulated and non-insulated overhead wires with variations in load currents, taking into account weather conditions] // *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines*. 2016. Vol. 3, no 1. P. 67–76. EDN: XBFJKV. (In Russ.).

PETROVA Elena Vladimirovna, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.

SPIN-code: 2750-7350

AuthorID (RSCI): 685250

Correspondence address: evpetrova2000@yandex.ru

GIRSHIN Stanislav Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1125-1521

AuthorID (RSCI): 297584

AuthorID (SCOPUS): 57190579930

KRIVOLAPOV Vladislav Aleksandrovich, Graduate Student of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

Correspondence address: KrivolapovVladislav1998@gmail.com

KHATSEVSKIY Konstantin Vladimirovich, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Electrical Engineering Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7219-6033

AuthorID (RSCI): 465857

ORCID: 0000-0001-9504-1312

AuthorID (SCOPUS): 56503931800

ResearcherID: A-4002-2016

Correspondence address: xkv-post@rambler.ru

GORYUNOV Vladimir Nikolayevich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 2765-2945

AuthorID (RSCI): 302109

AuthorID (SCOPUS): 7003455231

Correspondence address: vladimirgoryunov2016@yandex.ru

TROTSENKO Vladislav Mikhaylovich, Senior Lecturer of Power Supply for Industrial Enterprises Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 3958-5882

AuthorID (RSCI): 889516

For citations

Petrova E. V., Girshin S. S., Krivolapov V. A., Khatsevskiy K. V., Goryunov V. N., Trotsenko V. M. The analysis of losses in protected and non-insulated wires in stationary modes, taking into account weather conditions // *Omsk Scientific Bulletin*. 2024. No. 3 (191). P. 99–109. DOI: 10.25206/1813-8225-2024-191-99-109.

Received February 22, 2024.

© E. V. Petrova, S. S. Girshin, V. A. Krivolapov,

K. V. Khatsevskiy, V. N. Goryunov, V. M. Trotsenko