

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДПОСЫЛОК ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОБРАТНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ ГИРЛЯНД ИЗОЛЯТОРОВ МАГИСТРАЛЬНЫХ ЛЭП И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТА ИХ ПОВРЕЖДЕНИЯ

С учетом негативной статистики перекрытий линейных изоляторов в условиях грозовых воздействий поставлена цель — исследовать характеристики стеклянных изоляторов в различных погодных условиях, в том числе изоляторов, загрязненных частицами ржавого металла. Приведен анализ измеренных параметров стеклянных тарельчатых изоляторов, переходных сопротивлений контактных соединений в цепи «заземляющий проводник грозотроса — тросостойка — заземляющее устройство опоры линии электропередачи», даны рекомендации по снижению рисков перекрытий линейной изоляции. Рассмотрены актуальные вопросы оптимизации проведения поиска мест повреждения стеклянных изоляторов.

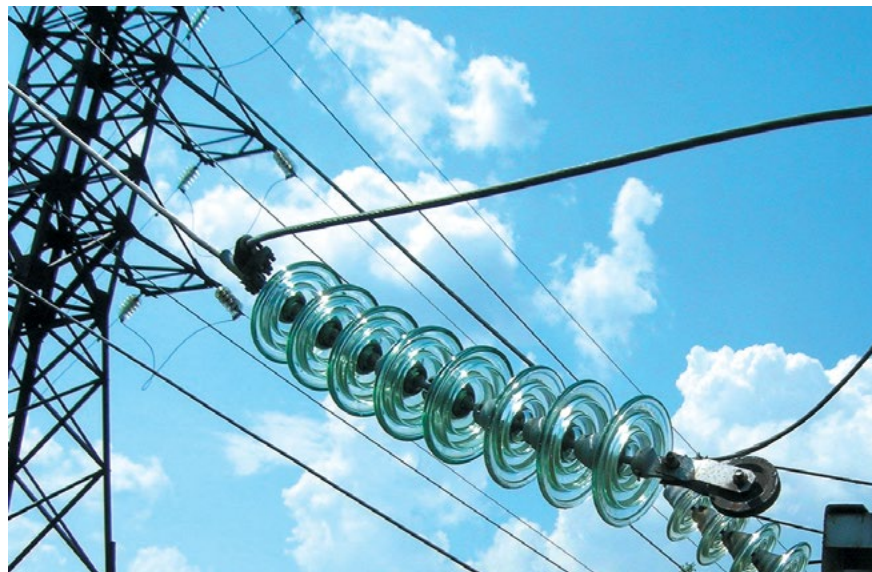
АВТОРЫ:

А.Ю. Киселев,
Филиал ПАО «Россети» —
Якутское ПМЭС

А.П. Львов,
Филиал ПАО «Россети» —
МЭС Востока

П.Ф. Васильев,
к.т.н., ИФТПС СО РАН

П.С. Пинчуков,
к.т.н., ДВГУПС



Ключевые слова:

#грозоупорность ЛЭП;
заземляющее устройство;
#стеклянный тарельчатый изолятор;
#грозозащитный трос;
#импульсная прочность.

Грозоупорность ЛЭП — это устойчивость линии к воздействию грозовых перенапряжений, при этом показателем грозоупорности ЛЭП является количество ее грозовых отключений [1].

Согласно [2] количество грозовых отключений линии без грозотроса, определенное расчетом с учетом опыта эксплуатации, не должно превышать без усиления изоляции трех

в год для ЛЭП напряжением 110–330 кВ и одного в год для ЛЭП напряжением 500 кВ.

Изолятор в линии электропередачи является важным элементом арматуры для подвески фазных проводников, предотвращающим протекание линейного тока в направлении пути заземления при нормальной работе. Однако у линейных изоляторов всегда есть риск пробоя, который может

произойти из-за перенапряжений, отложения токопроводящих загрязнений, влаги, ухудшения номинальной емкости из-за старения и т.д.

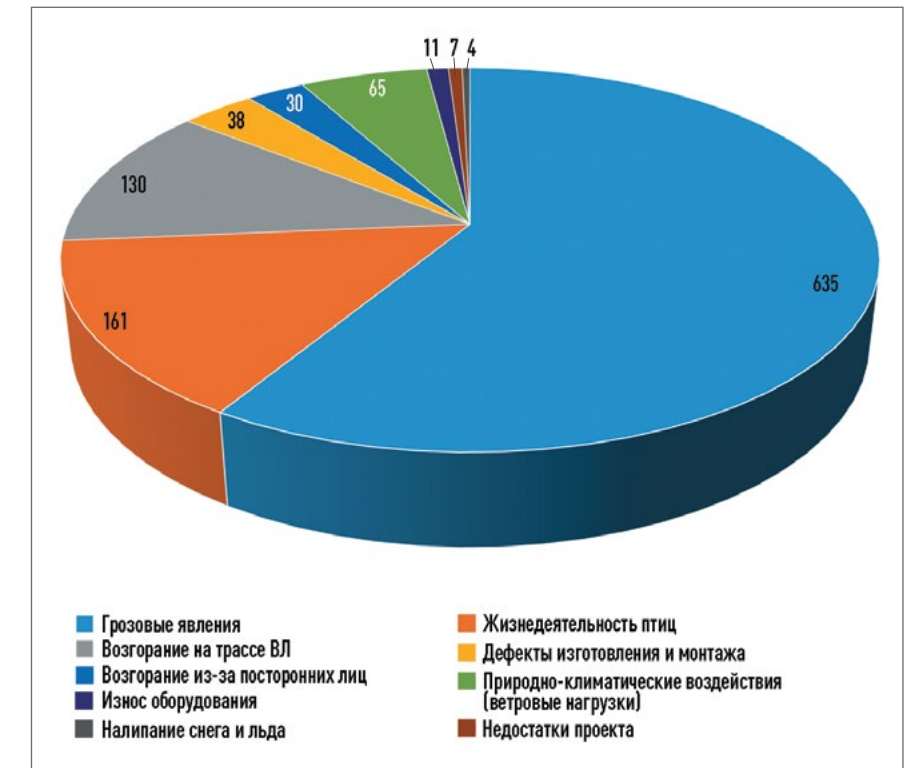
Несмотря на множественные исследования эффективности различного рода материала и конфигурации изоляторов, явления внезапных пробоев наблюдаются до сих пор. В последнее время набрали популярность экспериментальные и численные исследования, которые могут прогнозировать и объяснять процессы пробоя изоляторов. Эти исследования охватывают экспериментальный анализ пробивного напряжения стеклянных изоляторов с загрязненным слоем на их поверхности и без него. Экспериментальный результат хорошо анализируется путем моделирования электрического поля и распределения потенциала в программной платформе COMSOL Multiphysics с использованием 2D-геометрической модели изолятора. Обнаружено, что при нанесении солевого раствора на поверхность изолятора пробивное напряжение изолятора уменьшается наполовину. Кроме того, примеси влияют на пробивное напряжение изолятора, а уровень загрязнения напрямую влияет на ток утечки и старение изолятора. Результаты таких исследований изложены в [3–7].

Основными источниками грозовых перенапряжений на изоляции ЛЭП являются следующие воздействия молнии: прямые разряды в ЛЭП (в фазный провод, опору, трос); разряды вблизи от ЛЭП (в землю или объекты). В первом случае говорят, что на изоляции ЛЭП имеют место перенапряжения прямого разряда молнии, во втором — индуктированные перенапряжения.

Учитывая опыт эксплуатации ЛЭП напряжением 220 кВ, необходимо отметить, что обратные перекрытия линейной изоляции при разрядах молнии в грозотрос или тросостойку

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АВАРИЙНЫХ ОТКЛЮЧЕНИЙ НА ВЛ 220–500 КВ МЭС ВОСТОКА ПО ПРИЧИНАМ С 2017 ПО 2022 Г.

Рис. 1



опоры происходят более чем в 50% случаев аварийных отключений ЛЭП в условиях грозовых воздействий. На ЛЭП напряжением 330–500 кВ доля обратных перекрытий мала вследствие значительной строительной длины гирлянды изоляторов [8].

Наглядно соотношение причин повреждений на воздушных линиях 220–500 кВ на примере МЭС Востока показано на рис. 1.

Более 80% отключений носят неустойчивый характер, при котором благодаря успешному автоматическому повторному включению (АПВ) ВЛ остается в работе. Это усложняет процесс поиска повреждения при послеаварийном обходе и увеличивает значимость точных и надежных приборов определения места повреждения (ОМП).

При одинаковых параметрах молнии перенапряжения прямого разряда опаснее для изоляции, нежели индуктированные перенапряжения. Однако вероятность прямого разряда молнии зависит от многих факторов, и может получиться так, что не прямые разряды молнии являются основной причиной перекрытия изоляции при грозовых перенапряжениях, а индуктированные [8].

В случае прямого удара молнии в заземленную опору ЛЭП после многократных отражений волны от заземлителей и вершины опоры начинается процесс протекания через опору импульсных токов. Проходящий через опору ток создает падение напряжения в сопротивлении заземления. Это напряжение считается полностью приложенным к изоляции, так как напряженность электрической

СЛЕДЫ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ИЗОЛЯЦИИ КВЛ 220 кВ ТОММОТ — МАЙЯ II ЦЕПЬ



Рис. 2

03.08.2022. Так как на КВЛ 220 кВ Томмот — Майя I, II установлены устройства волнового ОМП — волновые терминалы TOP 300 ВОМП системы ВОМП [9], место повреждения было обнаружено в течение суток.

Измерение характеристик линейных изоляторов

В результате опытных исследований получены данные нетиповых измерений тангенса угла диэлектрических потерь и емкости изоляторов марки ПС-70 Б, приведенные на рис. 3–5.

Анализ результатов измерений показал, что изоляторы, смоченные водой, по сравнению с сухими обладают большей электрической емкостью, а следовательно, меньшим электрическим сопротивлением. Наблюдается разница в значениях электрической емкости единичного изолятора (сухой/смоченный водой) порядка 7 пФ. С увеличением количества изоляторов в гирлянде эквивалентная емкость гирлянды снижается, причем корреляция емкости с тем фактором, смочен изолятор или нет, ослабевает.

Кроме того, были измерены пробивные напряжения произвольно выбранных изоляторов марки ПС-70 Б, в результате которых получены следующие средние значения: для увлажненного и загрязненного частицами ржавого металла 14 кВ, для сухого загрязненного частицами ржавого металла 25–30 кВ. Информационно, согласно

При таких неустойчивых коротких замыканиях (КЗ) характер повреждения таков, что повреждение неразличимо при низовом послеаварийном обходе без проведения верхового осмотра и анализа фотоматериалов. Поиск места КЗ может длиться несколько недель. На рис. 2 приведены следы электродугового воздействия на изоляции, обнаруженные в результате проведения послеаварийного осмотра кабельно-воздушной линии (КВЛ) 220 кВ Томмот — Майя II цепь

кого поля по мере удаления от места прямого удара резко уменьшается и потенциал на проводе даже в непосредственной близости от опоры будет близок к нулю [8].

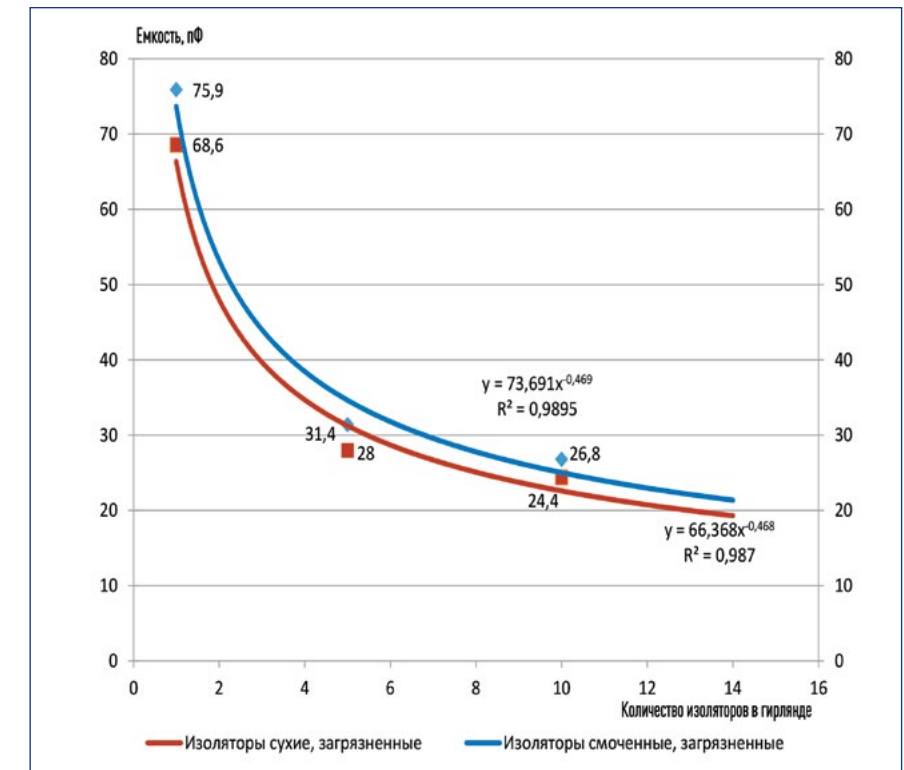
При ударе молнии в опору ЛЭП или грозотрос (заземленные части) в результате повышения импульсного потенциала на траверсе в месте крепления изолирующей подвески фазного провода к опоре может произойти так называемое обратное перекрытие [4].

ДАННЫЕ АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ КВЛ 220 кВ ТОММОТ — МАЙЯ II 03.08.2022

Наименование КВЛ	Дата, время отключения, мск	АПВ	Расчетное место повреждения, км	Причина отключения	Фактическое место повреждения, км	Подробности повреждения	Погрешность расчета ВОМП, %
Томмот — Майя II цепь	03.08.2022, 09-56	Успешное	181,5	Грозовые явления	181,3	ф. А — следы грозового перекрытия на изоляции, ф. В — следы грозового перекрытия на проводе	0,11

ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТИ ЗАГРЯЗНЕННЫХ ИЗОЛЯТОРОВ ОТ ИХ КОЛИЧЕСТВА В ГИРЛЯНДЕ

Рис. 3



ГОСТ 27661–2017 [10], выдерживаемое напряжение промышленной частоты под дождем для изоляторов указанного типа должно составлять 40 кВ.

В условиях увлажнения характер полного сопротивления меняется от емкостного в начале испытаний до активного. Распределение напряжения по изолятору также меняется во времени.

С ростом увлажнения большая часть приложенного напряжения падает на очень узкую сухую полосу вокруг пестика. Эта узкая полоса шириной 1–2 мм образуется из-за наличия тока утечки. Если эта узкая полоса не может выдержать приложенное к изолятору напряжение, начинается свечение. Сухая полоса перекрывается частичными разрядами, и напряжение оказывается распределенным по увлажненной поверхности.

Измерение переходных сопротивлений

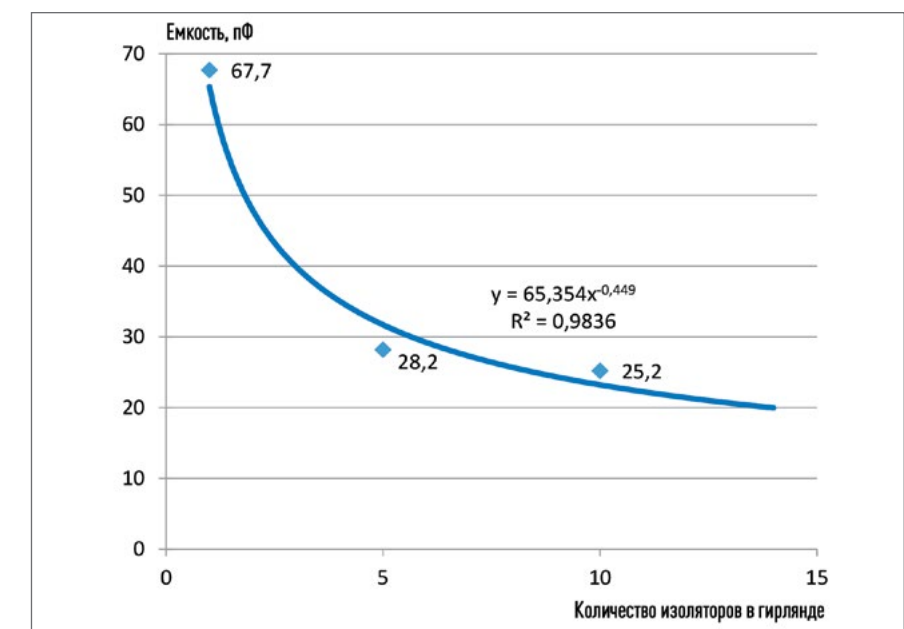
В ходе эксперимента с применением измерительного прибора MRU-200 получены данные нетиповых измерений — переходных сопротивлений контактных соединений в цепи «заземляющий проводник грозотроса — тросостойка — заземляющее устройство опоры», фотографии процесса измерений представлены на рис. 6–8.

По результатам измерений выявлено, что применение плашечных зажимов в цепи «грозотрос — тросостойка» в нарушение требований [11], наличие болтовых соединений в несущих уголках опоры (посредством которых несущие уголки собираются в «пакеты»), а также в цепи «заземляющий проводник — тело опоры» приводит к возникновению переходного электрического сопротивления (до 9 Ом).

Напомним, что требования типовой инструкции [11] по замене стеклянных изоляторов по условиям электрической прочности гласят: «заме-

ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТИ НОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ, СМОЧЕННЫХ ВОДОЙ, ОТ ИХ КОЛИЧЕСТВА В ГИРЛЯНДЕ

Рис. 4



ЗАВИСИМОСТЬ ЕМКОСТИ НОВЫХ ИЗОЛЯТОРОВ, НЕ СМОЧЕННЫХ ВОДОЙ, ОТ ИХ КОЛИЧЕСТВА В ГИРЛЯНДЕ

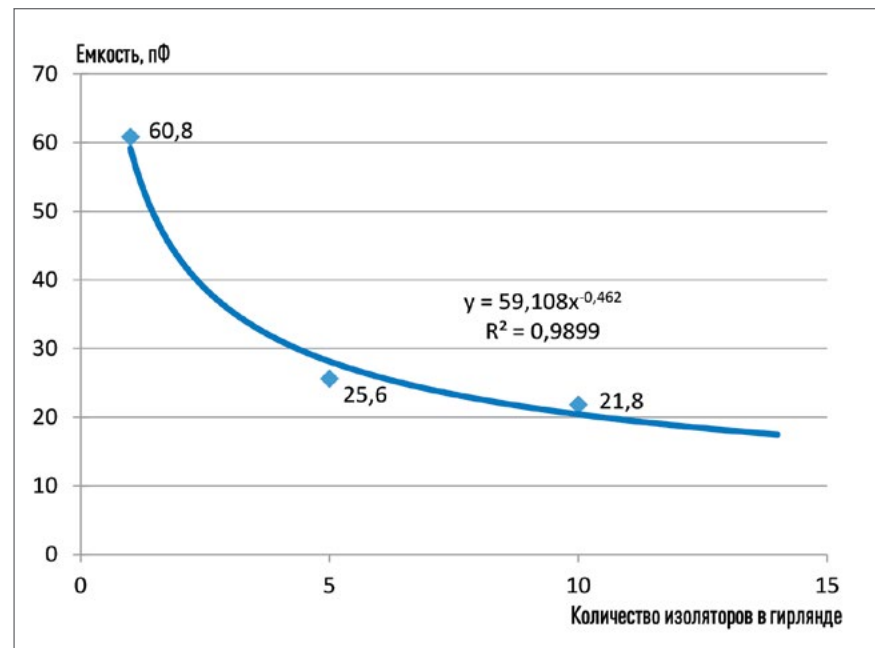


Рис. 5

на должна производиться в срочном порядке — при наличии в гирлянде изолирующей подвески свыше 30% неисправных изоляторов; в течение ближайших трех месяцев — при наличии в гирлянде изолирующей подвески свыше 20 до 30% неисправных изоляторов и при очередном капитальном ремонте — при наличии в гирлянде изолирующей подвески до 20% неисправных изоляторов». Вследствие возможных рисков перекрытия стеклянных изоляторов в грозовой период повышается вероятность аварий на ЛЭП с серьезными последствиями для потребителей.

■ Заключение

Грозовые перенапряжения могут определять выбор изоляции при высоком сопротивлении заземления и высокой грозовой деятельности. В большинстве случаев нельзя пренебрегать тем или другим типом переходного процесса.

ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЦЕПИ «ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ ПРОВОДНИК ГРОЗОТРОСА — ТРОСОСТОЙКА — ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ОПОРЫ» С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА MRU-200

Рис. 6



ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЦЕПИ «ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ ПРОВОДНИК ГРОЗОТРОСА — ТРОСОСТОЙКА — ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ОПОРЫ» С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА MRU-200

Рис. 7



ПРОЦЕСС ИЗМЕРЕНИЙ ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В ЦЕПИ «ЗАЗЕМЛЯЮЩИЙ ПРОВОДНИК ГРОЗОТРОСА — ТРОСОСТОЙКА — ЗАЗЕМЛЯЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ОПОРЫ» С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА MRU-200

Рис. 8



Изоляция на линиях электропередачи должна быть достаточной, чтобы обеспечить надежную эксплуатацию. Однако решение об обеспечении полного отсутствия пробоев изоляции было бы слишком консервативным и дорогим.

Эксплуатация линейных изоляторов усложняется из-за большого разнообразия метеорологических условий, в которых может находиться линия электропередачи, а также из-за статистического разброса пробивного напряжения самой изоляции. Переходные процессы могут произойти при различных метеорологических условиях, которые по-разному влияют на электрическую прочность изоляторов.

При анализе соответствия сопротивлений заземляющих устройств опор ЛЭП требуемым значениям необходимо учитывать фактические сопротивления цепи «грозотрос — тросостойка», наличие болтовых соединений в несущих уголках опоры, а также в цепи «заземляющий проводник — тело опоры», которые могут существенно отличаться от нулевых значений.

По полученным в ходе измерений значениям пробивного напряжения изоляторов марки ПС-70 Б для увлажненного и загрязненного частицами ржавого металла и для сухого загрязненного частицами ржавого

металла — соответственно 14 и 25–30 кВ — можно судить о сниженной эквивалентной импульсной прочности гирлянды из таких изоляторов в целом, что влечет за собой риски обратных перекрытий линейной изоляции при поражении молнией заземленных элементов ЛЭП.

При возможности замены дефектной линейной изоляции, а также изоляции с ухудшенными диэлектрическими свойствами необходимо производить до наступления грозового сезона. Но выполнение работ в эти сроки осложняется бизнес-процессами планирования технического обслуживания и ремонта ЛЭП.

Для предотвращения стекания на линейную изоляцию водяной взвеси частиц металла рекомендуется производить окрашивание траверс, подверженных коррозии, специальными эмалями (например, грунт-эмаль СБЭ-111 «УНИПОЛ», положительно зарекомендовавшей себя на объектах электроэнергетики).

Практически применимо использование составных гирлянд изоляторов из полимерной и стеклянной изоляции в целях повышения грозоупорности ЛЭП (в зарубежной практике положительно оценивается результат применения данных изоляционных конструкций для повышения импульсной прочности изолирующей подвески) [12].

Следует отметить, что более совершенные методы выбора изоляции должны содержать детальную оценку относительных частот возникновения всех возможных комбинаций электрических и метеорологических условий, оценку влияния выбора изоляции на общие параметры линии, а также определение мероприятий, которые могут повлиять на снижение числа аварийных отключений. Эти методы обычно требуют применения ЭВМ для детального изучения всей проблемы и, в частности, для более надежной оценки метеорологических условий и данных переходного процесса.

К тому же не следует забывать про индуктивность опор ЛЭП, особенно металлических решетчатых опор, а также про переходные сопротивления, оказывающие влияние на электромагнитные переходные процессы, возникающие при разрядах молнии в такие элементы ЛЭП, как грозотрос и тросостойка.

В связи с этим необходимо шире применять современные методы анализа и выбора линейной изоляции с применением ЭВМ, так как только таким путем можно качественно

улучшить изучение всех факторов, влияющих на эту проблему.

При этом около 80 % перекрытий изоляции носит неустойчивый характер, что усложняет процесс поиска места повреждения [13]. Большую роль в локализации зоны послеаварийного обхода играет точность приборов ОМП. Относительная погрешность устройств ВОМП значительно меньше погрешности традиционных приборов ОМП, что приводит к снижению затрат на проведение послеаварийных обходов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Стандарт организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007–29.240.02.001–2008 «Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4–10 кВ от грозовых перенапряжений» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200088718> (дата обращения: 11.04.2023).
2. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Утв. Приказом Министерства энергетики Российской Федерации от 08.07.2002 № 204 [Электронный ресурс]. URL: https://minstroy.gov-murman.ru/files/4.14_-_pue_tekst.pdf (дата обращения: 10.02.2023).
3. Овсянников А.Г., Тарасов А.Г., Яншин Э.В. Тарельчатые изоляторы на воздушных линиях. Причины разрушения при грозовых воздействиях // Новости электротехники. 2010. № 6 (66). [Электронный ресурс]. URL: (<http://news.elteh.ru/arh/2010/66/09.php>) (дата обращения: 18.03.2023).
4. Брыкин В., Лопатин В., Илюшов Н., Коробейников С., Лавров Ю., Ломан В., Скрабина Е. Проблемы грозоупорности линий электропередачи и подстанций в районах Крайнего Севера // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. № 3. С. 30–37. URL: <https://eepir.ru/article/problemy-grozoopornosti-linij-eklektroperedachi-i-podstanciy-v-rayonah-krajnego-severa> (дата обращения: 18.03.2023).
5. Поляков Д.А. и др. Исследование характеристик частичных разрядов в искусственных дефектах линий электропередачи // Омский научный вестник. 2020. № 6 (174). С. 63–68. DOI: 10.25206/1813–8225–2020–174–63–68.
6. Pang, Wei. Adopting Differential Lightning Protection Measures to Reduce Simultaneous Trip Probability of 220 kV Double-Circuit Transmission Line on the Same Tower. *Journal of Physics: Conference Series*. 2310. 012019. 10.1088/1742–6596/2310/1/012019. 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/364479439_Adopting_Differential_Lightning_Protection_Measures_to_Reduce_Simultaneous_Trip_Probability_of_220_kV_Double-Circuit_Transmission_Line_on_the_Same_Tower (дата обращения: 18.03.2023).
7. Cao, Wei & Wan, Shuai & Gu, Shanqiang & Xu, Heng & Chen, Jiahong & Wang, Jian & Lv, Jun. Development and Application of Lightning Flashover Limited Equipment for 220 kV AC Transmission Line // *The Journal of Engineering*. 2019. 10.1049/joe.2018.8357. URL: https://www.researchgate.net/publication/328478626_Development_and_Application_of_Lightning_Flashover_Limited_Equipment_for_220_kV_AC_Transmission_Line (дата обращения: 18.03.2023).
8. Киселев А.Ю. Способы повышения грозоупорности воздушных линий электропередачи Объединенной энергосистемы Востока // *Энергетик*. 2021. № 9. С. 21–26.
9. Лачугин В.Ф., Панфилов Д.И., Попов С.Г., Платонов П.С., Алексеев В.Г., Ключкин Н.Г., Подшивалин А.Н. Разработка и применение устройств определения места повреждения на линиях электропередачи с использованием волновых методов // *Энергия единой сети*. 2021. № 5–6. С. 50–66.
10. ГОСТ 27661–2017 «Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Типы, параметры и размеры. Line suspension disk insulators. Types, parameters and dimensions» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200146450#7D20K3> (дата обращения: 15.05.2023).
11. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35–800 кВ. РД 34.20.504–94. М.: ЭНАС, 2008.
12. Ким Е.Д., Черзан К.Л. Эффективность использования линейных полимерных изоляторов в комбинации со стеклянными изоляторами // *Электроэнергия. Передача и распределение*. [Электронный ресурс]. URL: https://eepir.ru/technical_article/jeffektivnost-ispolzovaniya-linijnyh-polimernyh-izolyatorov-v-kombinacii-so-steklyannymi-izolyatorami (дата обращения: 11.05.2023).
13. Львов А.П., Пинчуков П.С., Оптимизация поиска мест повреждения воздушных линий электропередачи 220 кВ, расположенных на территории Республики Саха (Якутия) с применением волновых ОМП // *Электроэнергия. Передача и распределение. СПЕЦВЫПУСК «РОССЕТИ»*. 2023. № 1 (28). С. 44–48.