«Воздушные линии»

Исследовательский комитет B2

Евгений Ляпунов;
Юлия Жилкина, кандидат экономических наук, ПАО «ФСК ЕЭС» филиал МЭС Центра

Международный совет по большим электрическим системам высокого напряжения (Conseil International des Grands Réseaux Électriques — CIGRE) — крупнейшая международная неправительственная и некоммерческая организация в области электроэнергетики. СИГРЭ создан в 1921 году во Франции со штаб-квартирой в Париже. На сегодняшний день является одной из наиболее авторитетных научно-технических ассоциаций, которая объединяет ученых и специалистов-энергетиков всего мира, и оказывает сильное влияние на формирование стратегии развития отрасли многих стран.

Основная цель СИГРЭ в соответствии с уставом организации — координация исследований, обмен опытом и научно-технической информацией по вопросам функционирования электроэнергетических систем. В центре внимания находятся вопросы разработки, создания и эксплуатации высоковольтного оборудования, задачи планирования и эксплуатации энергосистем, разработки и внедрения новых технологий сбора и обработки информации и систем управления.

Предметной областью Исследовательского комитета B2 являются проектирование, строительство и эксплуатация ВЛ переменного и постоянного тока высокого и сверхвысокого напряжения, а также их компоненты — провода, изоляторы, линейная арматура, мачтовые опоры и фундаменты. Сюда же входят техническое обслуживание, ремонт, увеличение срока службы ВЛ и природоохранные аспекты. Техническое направление работы ИК B2 включает в себя повышение допустимой токовой нагрузки существующих линий, обеспечение их надежности и экологичности, оценку линий, методов, новых инструментальных средств и материалов.

Воздушные линии играют важную роль в развитии энергосистемы будущего и решении сопутствующих задач. В состав исследовательского комитета B2 входят регулярные члены из 24 стран, пять регулярных дополнительных членов, наблюдатели из 16 стран и семь консультативных координационных групп.

Для сессии СИГРЭ в 2021 г. ИК B2 отобрал три предпочтительные темы.

1. *Техническое обслуживание по состоянию для повышения надежности:*
- мониторинг и моделирование;
- индекс исправности, остаточный ресурс, механизмы деградации;
- оценка рисков.

2. *Улучшение характеристик воздушных линий:*
- инновационные конструкции и материалы, компактность, преобразование переменного тока в постоянный, повышение напряжения, повышение допустимой токовой нагрузки, оптимизация потерь и др.;
- пропускная способность по току и потери в линии;
- заземление, защита от грозовых разрядов.

3. *Условия и факторы, влияющие на процесс проектирования:*
- проектирование с учетом строительства, обслуживания, отработки и восстановления ресурса, выполнения работ на линиях под напряжением, эргономики, навыков монтажа и техобслуживания, робототехники;
- проектирование и реконструкция в меняющихся условиях среды.

ОБЗОР ДОКЛАДОВ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ ПО ТЕМАТИКЕ ИК B2

Предпочтительная тема 1.

Техническое обслуживание по состоянию для повышения надежности

В последние годы приобретает все более высокую значимость тема экологии. С одной стороны, экологичность важна для общественного одобрения новых проектов; с другой стороны, экологические цели и цели устойчивого развития все чаще становятся обязательным условием для производителей оборудования и электросетевых компаний.

ПТ1 / ГРУППА 1. МОНИТОРИНГ МЕХАНИЧЕСКИХ ПАРА-МЕТРОВ, ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ

B2-103. *B. E. NYGAARD* (Норвегия). Разработка датчиков для мониторинга ледовых нагрузок на воздушных линиях в режиме реального времени.

B2-106. *S. OHARA* (Япония). Расширенное техническое обслуживание опор воздушных линий электропередачи.

B2-108. *M. LU* (КНР). Экспериментальное исследование и анализ механизма аномальной температуры композитных изоляторов в переменном токе 500 кВ.

B2-115. *N. PINHO DA SILVA* (Португалия). Спутниковый мониторинг воздушных линий.

B2-117. *J. TOTH* (Исландия). Искусственный интеллект как инструмент проверки линий электропередачи.

В докладе B2-103 приведена информация о разработке датчиков для мониторинга нагрузок при образовании льда на воздушных линиях в условиях реального времени. Прототип такого датчика прошел испытания в лаборатории и был установлен на воздушной линии электропередачи (ВЛ).

Процесс технического обслуживания опор воздушных линий электропередачи в целях оптимизации обслуживания «старой» инфраструктуры рассмотрен в докладе B2-106. Предложены два метода оценки распределений скорости коррозии и коррозионных факторов окружающей среды в Японии.

В докладе B2-108 представлены экспериментальное исследование и анализ механизма аномального нагрева композитных изоляторов на воздушных линиях переменного тока 550 кВ, а также проверка с помощью инфракрасного контроля композитного изолятора переменного тока 500 кВ. Изоляторы сканировались в лаборатории с помощью электронного микроскопа и рентгеновского аппарата.

Доклад B2-117 посвящен контролю ВЛ с помощью искусственного интеллекта. Обученная система искусственного интеллекта (ИИ) может выполнять задачи с высокой достоверностью, быстротой, согласованностью результатов и экономически эффективным способом для изоляторов определенного типа.

В докладе B2-115 изложен анализ спутникового мониторинга воздушных линий. Проведена детальная классификация земельных участков с выявлением возможных критических изменений. Кроме того, проведена оценка текущего состояния ВЛ и состояния древесно-кустарниковой растительности в охранных зонах ВЛ.

ПТ1 / ГРУППА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ, ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ

B2-101. *M. FULK, T. D. PARRISH, A. J. PHILLIPS* (США). Мониторинг новой ЛЭП.

B2-105. *T. KAVANAGH* (Ирландия). Новый подход к определению превышения температуры зажимов опрессовываемого соединителя на воздушных линиях.

B2-109. *Y. H. KIM, G. M. KWON, H. S. AN* (Республика Корея). Разработка компактного детектора для диагностики коррозии на состарившихся воздушных проводах.

B2-116. *A. B. JONASSON* (Исландия). Исследование оценки состояния стальных опор ВЛ в Исландии.

Доклад B2-101 посвящен результатам мониторинга конструкции новой линии электропередачи в течении трех лет. Новая конструкция опор прошла проверку и в будущем будет применяться для большего числа линий.

В докладе B2-105 предложен способ определения превышения допустимой температуры зажимов опрессовываемого соединителя на воздушной линии 110 кВ. Результаты показывают, что испытания на температурном цикле недостаточно надежны для оценки поведения тестируемых соединений в течение длительного времени и, что работа ветровых установок может вызывать преждевременное повышение температуры в компрессионных фитингах.

В докладе B2-109 описывается разработка ком-пактного детектора определения коррозии с целью диагностики изношенных проводов ЛЭП и приводятся полученные результаты на ВЛ. Новый метод диагностики позволяет обнаруживать КЗ на проводах ВЛ (внутри и снаружи) с помощью портативного детектора коррозии.

Доклад B2-116 рассказывает об исследовании оценки состояния стальных опор ВЛ. В докладе представлен практический метод оценки для сбора больших массивов данных, относящихся к определению размеров оцинкованных слоев на стальных элементах.

ПТ1 / ГРУППА 3. ИНДЕКС ИСПРАВНОСТИ, ОСТАТОЧНЫЙ РЕСУРС, МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ

B2-102. *A. ISTAD LEM* (Норвегия). Подход к обеспечению надежности при проектировании линий электропередачи.

B2-111. *A. KUCHERIAVENKOV* (Россия). Создание географической информационной системы грозовой активности на основе существующего комплекса распределительных сетей 6–110 кВ с использованием устройств идентификации неисправностей воздушных линий.

B2-118. *K. SCHILLAI* (Республика Корея). Пределы измерения амплитуды колебаний на основе износа конструкции проводника.

B2-119. *C. C. KOKALIS, T. T. TASAKOS, V. T. KONTARGYRI, G. SIOLAS* (Греция). Классификация гидрофобности композитных изоляторов с наложением нейронных сетей.

Доклад B2-102 представляет подход к обеспечению надежности опор при проектировании воздушных линий. Новшество заключается в анализе надежности конструкций путем моделирования методом Монте-Карло.

В докладе B2-111 приведены результаты построения геоинформационной системы грозовой активности на базе имеющегося комплекса распределительных сетей 6–110 кВ с использованием устройств определения поврежденного участка воздушной линии.

В докладе B2-118 обсуждаются нормы измеряемой амплитуды вибрации на основе расчета износа проводников. Результаты показывают, что процедуры проектирования, основанные на современных аналитических моделях, могут не обеспечивать достаточного запаса надежности в зависимости от диаметра троса и проводника, угла провисания и геометрии арматуры.

Доклад B2-119 посвящен результатам классификации гидрофобности композитных изоляторов с преобразованием нейронных сетей. Точность распознавания, достигнутая на лучшей из трех сетей, составила 84,29 %. Преимуществами этого метода являются: простой и быстрый процесс фотографирования, быстрота исследования сетей, удовлетворительная точность распознавания и возможность развертывания этих сетей на встроенных платформах и использования в авиационных работах для проверки композитных изоляторов на местах.

ПТ1 / ГРУППА 4. ОЦЕНКА РИСКОВ, ТЕХНИЧЕСКАЯ НАДЕЖНОСТЬ

B2-113. *R. SERRANO* (Республика Чили). Комплексная нормативная база устойчивости электрических объектов к лесным пожарам.

B2-114. *A. COELHO* (Португалия). Лидарная (лазерная) инспекция воздушных линий электропередачи с помощью беспилотных летательных аппаратов.

В докладе B2-113 рассматриваются нормативная база и стратегии, касающиеся устойчивости электрических объектов при возможных лесных пожарах. Предлагается системный подход для проведения количественной оценки работы энергосистемы во время и после лесного пожара.

Доклад B2-114 представляет результаты инспектирования воздушных линий лидаром с помощью беспилотных летательных аппаратов. Лидар — это технология измерения расстояний путем излучения света (лазер) и замера времени возвращения этого отраженного света на ресивер. Основная цель — нормативная проверка соблюдения расстояний в коридорах воздушных линий электропередачи.

Предпочтительная тема 2.

Улучшение характеристик воздушных линий

ПТ2 / ГРУППА 1. ПРОВОДА ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

B2-203. J. F. GOFFINET (Бельгия). Высокопрочный стальной провод на пересечении новой линии 380 кВ в порту Антверпена.

B2-211. P. PORTER (Ирландия). Проверка конструкции проводника в испытаниях при высоких температурах.

B2-220. V. KURYANOV (Россия). Исследование сталеалюминиевых пластически уплотненных проводников для воздушных линий (ВЛ).

В докладе B2-203 описывается конструкция и характеристики специального провода, который относится к категории, известной как высокотемпературные провода с малыми стрелами провеса (HTLS), и проблемы, которые были преодолены при его установке на переходе линии в порту Антверпен в Бельгии.

В докладе B2-211 сообщается о полевых испытаниях, проведенных на проводнике с высокой проводимостью в Ирландии, и рассматриваются критерии, применяемые для отбора испытательных пролетов. Представлены результаты сбора данных и последующего анализа.

В докладе B2-220 рассматриваются разработка и характеристики алюминиевого уплотненного проводника, а также его преимущества и условия применения в России.

ПТ2 / ГРУППА 2. КОНСТРУКЦИИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

B2-204. *A. KVAMME BERSTAD* (Норвегия). Проектирование и испытание композитных опор для 420 кВ.

B2-209. *R. SCHLOSSER, C. NEUMANN* (Германия). Опыт установки инновационной воздушной линии электропередачи 400 кВ.

В докладе B2-204 представлены подходы к проектированию, проверке и утверждению композитных конструкций, используемых на линии 420 кВ в Норвегии.

Доклад B2-209 посвящен опыту германского инновационной компактной ВЛ в части проектирования, монтажа и контроля эксплуатации конструкций компактных воздушных линий, которые воспринимаются общественностью более лояльно.

ПТ2 / ГРУППА 3. ИЗОЛЯТОРЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

B2-206. *ENG. AHMAD ALTHAGFI* (Саудовская Аравия). Изоляторы с пескоструйным покрытием в суровых условиях пустыни.

B2-208. *M. MARZINOTTO, J. M. GEORGE, G. PIROVANO* (Италия). Опыт работы в полевых условиях и лабораторные результаты по нанесению пескоструйного покрытия на линии электропередачи высокого напряжения.

B2-218. *J. M. GEORGE* (Франция). Оценка эксплуатационных характеристик изоляторов с помощью контроля утечки тока в разных условиях.

B2-221. *C. BAER* (Швейцария). Технические требования для повышения надежности современных композитных изоляторов.

В докладе B2-206 описывается исследование, проведенное на стеклянных колпачковых и штыревых изоляторах с покрытием RTV различной толщины, и сообщается о методах испытаний, использованных для сравнения эксплуатационных характеристик.

В докладе B2-208 приведен детальный отчет о проведенных испытаниях и полученных результатах на изоляторах с пескоструйным покрытием, изношенных на месте эксплуатации (снятых после 7, 8 и 9 лет работы) и в лабораторных условиях.

В докладе B2-218 сообщается об исследованиях, проведенных на двух испытательных станциях во Франции и ЮАР на композитных, стеклянных изоляторах, с подробным анализом наблюдаемых характеристик утечки тока.

Доклад B2-221 сообщает о проведенной оценке контакта стержня с корпусом в композитных изоляторах, о влиянии электромагнитных полей на целостность изоляторов и о результатах воздействия азотной и серной кислот на корпус изолятора. Для юбилейной сессии СИГРЭ 2021 г. была получена отредактированная версия доклада B2-221. В него включены дополнительные результаты испытаний на множественные воздействия (с сочетанием воздействия азотной кислоты, тестов на трекинг и эрозию), проведенных авторами доклада.

ПТ2 / ГРУППА 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКИ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

B2-202. *A. ABBOUD (США).* Влияние воздушных проводников к переменным номинальной мощности ВЛ.

B2-205. *K. LENARCZYK* (Польша). Оптимизация потерь в воздушных линиях 400 кВ.

B2-216. *G. M. KWON* (Республика Корея). Двойная двухполюсная система с металлическим проводником в Корее.

B2-217. *T. K. SHACHIDEVI* (Индия). Опыт восстановления «нулевого» отключения в Индии.

B2-219. *B. NEMETH* (Венгрия). Разработка и реализация комплексной системы управления линиями электропередачи.

B2-222. *P. BLEULER* (Швейцария). Сравнение характеристик воздушных линий переменного и постоянного тока.

B2-223. *NENAD GUBELJAK* (Словения). Комплексный подход к обеспечению целостности ВЛ.

B2-224. *SMRUTI RANJAN MOHAPATRA* (Индия). Применение динамического рейтинга ВЛ в контексте тропических стран, таких как Индия.

В докладе B2-202 рассказывается о том, как незначительные различия некоторых переменных могут существенно влиять на точность расчета номиналов линий применительно к высокотемпературным проводникам. Отредактированный доклад B2-202 включает дополнительную информацию о коррелированных значениях поглощения и излучательной способности проводников. Также он проясняет вопрос о температурах проводников, используемых при анализе чувствительности переменных.

В докладе B2-219 рассмотрена система моделирования воздушных линий, которая учитывает климатические условия, параметры проводов и проектные характеристики профиля линии для оптимизации ее работы.

В докладе B2-224 рассматривается применение динамической оценки параметров линий в Индии, а также дается анализ проблем и рекомендаций по применению этого метода в условиях тропического климата.

В докладе B2-205 описывается проведенный авторами анализ конфигураций пучков фазных проводников различной конструкции в целях снижения джоулевых потерь в линии.

Доклад B2-222 посвящен исследованию коронных разрядов на проводниках в условиях испытаний на воздействие таких погодных условий, как дождь, туман и роса, подчеркивается важность изменений погоды для формирования короны.

В докладе B2-216 рассказывается о характеристиках двухполюсной линии 500 кВ постоянного тока в Корее в условиях переходных перенапряжений, а также о влиянии оконечных кабельных устройств по длине трассы ВЛ.

В докладе B2-217 приведен пример проекта повышения мощности, включающего замену проводников в Индии, который представлял особые трудности с точки зрения препятствий в полосе отвода и необходимости организации работы под напряжением.

В докладе B2-223 представлены результаты работы системы измерения и мониторинга конструкций опор воздушных линий электропередачи, которые дают возможность лучше понять принципы механического использования и эксплуатационные характеристики опор.

Предпочтительная тема 3.

Условия и факторы, влияющие на процесс проектирования

Реконструкция существующих линий под новые стандарты, проектирование новых линий с учетом изменения окружающих условий, повышение безопасности работ под напряжением — десять докладов, отобранных Исследовательским комитетом B2 по предпочтительной теме № 3, предлагают широкий ряд новаторских материалов по проектированию воздушных ЛЭП. Избранные материалы разделены по трем основным рубрикам: ПТ3/группы 1–3.

ПТ3 / ГРУППА 1. ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ

B2-302. *A. J. PHILLIPS, R. FERRARO (США).* Разработка портативного защитного разрядника воздушной линии электропередачи в режиме реального времени.

B2-304. *MAJA GRBIC* (Сербия). Воздействие электрического и магнитного поля на работников при проведении ремонтных работ на воздушных линиях электропередачи.

B2-312. *ROBERT MARUŠA* (Словения). Новое решение при строительстве высоковольтных воздушных линий.

Доклад B2-302 демонстрирует целесообразность использования портативных защитных разрядников ВЛ для защиты персонала во время работы на линии под напряжением. Данный инструмент позволяет проводить работы на опорах с уменьшенными зазорами на линиях, на которых работа под напряжением ранее была невозможна.

Доклад B2-304 предлагает детальный анализ рисков, связанных с возможным воздействием на работников электрических и магнитных полей на двухцепной линии 100 кВ. Авторы представляют методику, которая показывает, что работы на пассивной цепи можно проводить безопасным способом, пока вторая цепь остается активной.

Наконец, в докладе B2-312 объясняется, как использование изоляционной фольги на основаниях опор может уменьшить повышение потенциала земли. Показано, что данный подход снижает потенциал напряжения вокруг опоры и к тому же замедляет рост кустарников возле ее основания.

ПТ3 / ГРУППА 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ НОРМАТИВОВ

B2-307. *F. GHELICHI* (Нидерланды). Выбор оборудования для строительства воздушных линий на основе расчета выбросов CO_2.

B2-309. *W. K. LEE* (Швейцария). Разработка вертикальной трубчатой стальной опоры для ВЛ.

B2-311. *A. MARAVI* (Республика Корея). Перуанский опыт проектирования воздушных линий электропередачи напряжением 500 кВ на большой высоте.

В докладе B2-311 рассказывается об опыте Перу в части проектирования линии 500 кВ на высоте до 4500 м над уровнем моря. Воздушные зазоры рассчитывались по методам IEC и IEEE, хотя поправочные коэффициенты для таких высот не стандартизированы. Вычисления были дополнены моделированием с помощью специальной программы.

В докладе B2-309 описан новый тип трубчатой опоры, разработанный для упрощения ее перевозки в отдаленные районы. Конструкция основана на применении соединений внахлест и вертикально разделенных модулей.

Автор доклада B2-307 предлагает рекомендации по выбору оборудования для воздушных линий на основании расчетов эмиссии CO_2.

ПТ3 / ГРУППА 3. НОВЫЕ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ ЛИНИЙ

B2-303. *L. M. DICKIE* (Нидерланды). Роботизированная установка на линиях электропередачи.

B2-305. *J. RANIGA* (Германия). Управление шумом на линиях электропередачи.

B2-308. *C. ROZE* (Япония). Беспилотный летательный аппарат и его испытания для использования около ВЛ.

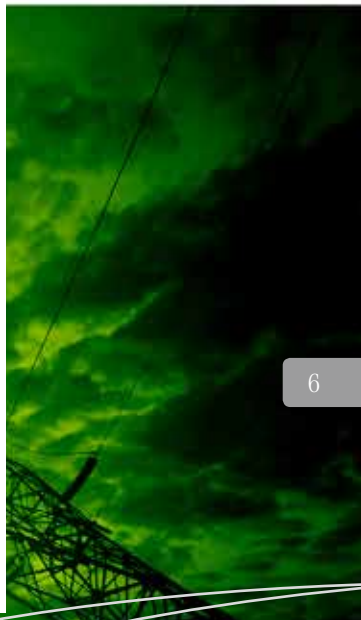
Доклад B2-303 касается разработки робота для быстрой и безопасной установки маркеров. Робот ставится на линию с помощью вертолета. На сегодняшний день с помощью этой технологии установлено уже более 400 маркеров.

Тема доклада B2-308 — поведение дронов при работе вблизи воздушных линий.

В докладе B2-305 приведены результаты исследования акустического шума проводов с учетом старения и различных видов обработки поверхности. Показано, что старение проводников снижает уровень акустических шумов.

В заключение необходимо отметить значение СИГРЭ, как платформы, благодаря которой компании электросетевого комплекса разных стран и отдельные специалисты могут свободно обмениваться своими знаниями и опытом. Национальный исследовательский комитет B2 также вносит большое научно-практическое значение в деятельность ряда международных рабочих групп, созданных при Исследовательском Комитете B2.

По итогам 48-й сессии по комитету B2 «Воздушные линии» можно отметить следующие наиболее обсуждаемые ключевые вопросы:

- новые перспективные направления проектирования, строительства и эксплуатации магистральных и распределительных электрических сетей;
- резонансные колебания трубчатых опор ВЛ;
- методики расчета и измерения фактической надежности арматуры ВЛ.

Особо следует отметить влияние пандемии КОВИД-19 на любую деятельность, связанную с воздушными линиями. Ограничения заставили всех, кто связан с проектированием, строительством и эксплуатацией ВЛ, мыслить и действовать по-новому. Предприятиям пришлось адаптировать свою повседневную деятельность к объективной реальности, чтобы учесть ограничительные меры, направленные на обеспечение безопасности персонала. Ограничения, связанные с поездками, существенно повлияли на традиционные методы оценки конструкции, посещения объектов, тестирования продукции. Производители и подрядчики вынуждены разрабатывать новые способы проведения удаленных и виртуальных приемочных испытаний. ЭS