

ПРИМЕНЕНИЕ ОПОР ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

АВТОРЫ:

Ю.М. Денчик,
Е.В. Иванова,
М.Н. Романов,
В.Г. Сальников,
Сибирский
государственный
университет
водного
транспорта

В качестве альтернативы традиционным материалам опор воздушных линий электропередачи предложено использование опор из композитных материалов. Композитные опоры на проектируемых или модернизируемых линиях электропередачи соответствуют высоким требованиям экологичности и надежности. Ограничение на использование этих опор накладывает их дороговизна. Предложена методика определения необходимого количества опор на воздушной линии 6–35 кВ исходя из требуемого показателя вероятности надежной работы и ограничения стоимости комплекта композитных опор.

Ключевые слова: воздушная линия; отказы; опора; композитные материалы; вероятность надежной работы; методика определения необходимого количества опор.



Воздушная линия
электропередачи 6 кВ
на композитных опорах

ВВЕДЕНИЕ

Воздушные линии (ВЛ) являются основным способом передачи электроэнергии потребителям в регионах с суровым климатом. Уровень повреждаемости элементов ВЛ определяется как свойствами конструкций, так и условиями их эксплуатации. По данным [1], наблюдается примерно следующее число отказов (на 100 км/год): опоры стальные — 0,027, опоры железобетонные — 0,028, опоры деревянные — 0,370, изоляторы — 0,180, арматура — 0,018, провода — 0,250.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Высокий уровень повреждаемости деревянных опор объясняется значительной потерей прочности вследствие загнивания деревянных опор в процессе эксплуатации и несвоевременной их заменой. Интенсивность загнивания древесины прежде всего зависит от качества ее пропитки антисептическими составами. Наиболее быстро процесс гниения развивается при влажности древесины от 30 до 60%. Такая влажность характерна для подземной части пасынков, торцевых и горизонтально расположенных деталей опоры, а также для мест их сопряжения, т.е. там, где затруднены условия высыхания влаги [2].

Опоры ломаются из-за недопустимого отклонения стоек от вертикального положения и смещения от оси ВЛ, а также от ударов молнии. Наблюдаются возгорания опор при касании проводом опоры и при низовых ударах молнии нередки расщепления и даже полные разрушения опор. На деревянных траверсах от токов утечки при загрязнении и увлажнении поверхности изоляции возникают нагрев и в некоторых случаях возгорание.

Основными причинами отказов железобетонных опор являются

развитие трещин и выкрашивание бетона, неплотная заделка в грунт, прослабление внутренних ветровых связей, коррозия арматуры (особенно в подземной части опор) и траверс. Железобетонные опоры с цилиндрическими и коническими центрифугированными стойками принципиально могут иметь достаточно высокую надежность — механическая прочность неповрежденного бетона даже после 20–30 лет эксплуатации практически остается на уровне заводской марки. Однако из-за нарушений правил транспортировки к месту установки на стойках образуются трещины. Этот вывод основан на одинаковом характере повреждений независимо от завода-изготовителя или места прохождения трассы ВЛ [1].

Нередки и заводские дефекты опор, три из которых можно считать основными: малая толщина защитного слоя бетона, некачественная сварка арматуры и неплотные стыковые швы. При центрифугировании или вибрировании бетона стальная арматура иногда смещается от оси симметрии, и толщина бетона в некоторых местах оказывается недостаточной для защиты металла от коррозии из-за облегченного проникновения влаги и кислорода из воздуха. Некачественная сварка арматуры, ее отсутствие или недостаточный отжиг приводят к обрыву стержней арматуры при растяжении и, как следствие, к резкому снижению механической прочности опоры. Стыковочные швы появляются вследствие неплотного прилегания полуформ, в которых изготавливаются опоры. Бетон в месте стыковки получается пористым и затем в эксплуатации выкрашивается, что приводит к обнажению арматуры, ее ускоренной коррозии и т.д. [1].

Основными причинами отказов металлических опор являются коррозия и старение. Ускоренная коррозия наблюдается в горизонтально расположенных элементах и в местах

сопряжения элементов, где влага накапливается быстрее, а высыхание происходит медленнее. Развитие коррозии приводит к снижению несущей способности, а иногда и к поломке опор [3].

Практические достижения металловедения указывают и на существование процессов старения металлов. Опыт эксплуатации показал, что чем прочнее используемый в конструкции металл, тем раньше в нем могут проявиться признаки деградации в виде усталостных трещин. Экспериментально установлено, что процесс коррозионного разрушения материалов конструкций в большей степени зависит от грунтово-климатических факторов трассы, а на процесс старения преимущественное влияние оказывают условия эксплуатации, конструктивное исполнение ВЛ, класс напряжения и режим ее работы [3].

Состояние фундаментов опор ВЛ 6–35 кВ, расположенных на территориях в северных регионах Российской Федерации, в значительной части оценивается состоянием грунта вдоль трасс линий электропередачи (ЛЭП). Наблюдается выталкивание из земной поверхности фундаментов. Эксплуатация ВЛ 6–35 кВ в этих условиях требует значительных финансовых и трудовых затрат.

У железобетонных фундаментов чаще повреждается наземная часть. Появление в ней трещин приводит к попаданию в них воды, расширению трещин при замерзании воды и последующему выкрашиванию бетона. Те же явления происходят в открытых колодцах анкерных болтов. Таким образом, основной объективной причиной повреждения железобетонных фундаментов является многократное повторение цикла замораживание–оттаивание влаги в бетоне [4]. Особенно это характерно для Западной и Восточной Сибири, поскольку в этих регионах

в осенне-весенний период в светлое время суток температура окружающей среды выше нуля, а ночью случаются заморозки. В году более 100 таких неблагоприятных дней. Для фундаментов, выполненных в виде металлических подложников, и для подземных анкерных оттяжек опор наибольшую опасность несет коррозия.

Таким образом, надежность опор ВЛ 6–35 кВ в северных регионах играет важную роль в обеспечении надежной и экономичной работы их систем электроснабжения. Это обуславливает рассмотрение инновационных решений в области опоростроения.

Многогранные гнутые стойки (МГС) [3], заложенные в конструкции металлических опор и фундаментов, позволяют значительно изменить технологию строительства ЛЭП и обеспечить высокие технико-экономические характеристики ЛЭП для наиболее распространенных типов линий 6–35 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Среди наиболее важных требований, предъявляемых к электросетевым конструкциям ВЛ, работающих в регионах с суровым климатом, являются максимальный ресурс работы конструкций в условиях эксплуатации и высокая надежность. В значительной мере требования обеспечиваются выбором материала и совершенством технологии изготовления конструкций из данного материала.

Комплексу перечисленных требований больше всего удовлетворяют композитные материалы (композиты) на основе современных углеродных, борных, органических и стеклянных волокон в сочетании с полимерными, металлическими, углеродными, керамическими и другими видами матриц [4]. Особенность композитов, как известно, в том, что они не являются материалом в классическом

смысле этого слова, таким как, например, металлы. Фактически это конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия. При этом композиты, выполненные из одного и того же наполнителя (волокна) и связующего по одинаковой технологии, могут иметь различные физико-механические характеристики, которые способны изменяться в широком диапазоне за счет выбора числа направлений армирования и объемных долей волокна в каждом направлении армирования [4].

Важнейшее достоинство композитов — возможность создавать из них элементы конструкций с заранее заданными свойствами, наиболее полно отвечающими характеру и условиям работы. Многообразие волокон и матричных материалов, различных схем армирования, используемых при создании композитов, позволяет направленно регулировать прочность, жесткость, уровень рабочих температур и другие свойства путем подбора состава, соотношения компонентов и макроструктуры компонента [4].

Композитные опоры ВЛ изготавливаются на основе применения различных стеклопластиков и волокнитов. Однако, оценивая общие тенденции развития композитов, авторы [5] делают вывод о том, что наиболее выгодным и перспективным может стать использование базальтового композита, который при схожей стоимости является главным конкурентом стеклопластика по механической прочности, химической стойкости и долговечности. Немаловажно, что в России существуют заводы, способные производить базальтовые изделия различной конфигурации. Определение области применения базальта для создания опор возможно после уточнения механических, электрофизических, химических и других свойств конструкций на его основе. Это даст ответ на конкретные вопросы унификации решений

и достижения высоких технико-экономических показателей. Кроме того, базальт может служить материалом для производства других изделий, применяемых для сооружения ВЛ, например, изоляторов, сочетающих в себе электрофизические преимущества стеклянных изоляторов и массогабаритные преимущества — полимерных [5].

Все волокниты являются анизотропными, т. е. их механические характеристики зависят от направления и ориентации волокон относительно прикладываемой нагрузки. Волокнит применяется для изготовления методом горячего прессования под давлением различных изделий технического назначения, работающих на изгиб и кручение, с повышенной ударной вязкостью и антифрикционными свойствами. Предназначается для производства технических изделий, к которым предъявляются повышенные требования в отношении механической прочности и теплостойкости [5].

Волокнит, используемый для изготовления стоек RStandart, представляет собой ткань, состоящую из плотно переплетенных синтетических волокон, пропитанную специальным составом, что позволяет изначально задать материалу стоек необходимые прочностные характеристики [5].

Развитие композиционных материалов открывает широкие перспективы в строительстве, ремонте и эксплуатации воздушных линий электропередачи всех классов напряжения. Применение прочных и легких диэлектрических опор дает возможность не только пересматривать принципы обеспечения надежности при механических воздействиях, но и обеспечивать повышение эффективности комплексов активной и пассивной грозовой защиты. В качестве изоляционной арматуры могут использоваться как траверсы консольного типа

с установкой штыревого или подвесного изолятора, так и нетрадиционные решения, когда в качестве изоляции выступают элементы опоры. Например, провод может быть прикреплен непосредственно к композитной стойке для ВЛ 6–35 кВ, что позволит существенно сократить количество отключений из-за повреждения изоляторов.

Композитные опоры на линиях нового поколения могут соответствовать самым высоким требованиям надежности, экологичности и эстетичности при высокой степени эффективности решений. Опора 6 кВ может быть перенесена и смонтирована практически вручную, а на линиях 35 кВ и выше конструкция опоры может быть использована как самостоятельный изолятор, иметь непосредственное крепление проводов, и может быть лишена заземляющего устройства. Композитные изоляционные опоры могут рассматриваться в качестве аварийно-восстановительного резерва для ВЛ всех классов напряжения.

Композитные изолирующие опоры могут решить проблему быстрых восстановительных ремонтов на ВЛ всех классов напряжения. Линии среднего напряжения подвержены частым авариям, связанным с опорами. Падение опор на линиях 6–35 кВ, как правило, имеет массовый характер. Ремонт ВЛ 6–35 кВ с упавшими опорами требует немалых трудозатрат. Решения могут быть как традиционными, так и радикальными. Опора может выполнять несколько функций: обеспечивать механическую прочность ВЛ и служить изоляционным материалом для провода.

К несомненным преимуществам композитных опор можно отнести:

- высокую удельную прочность;
- отсутствие металлических частей — вся опора и траверса —

диэлектрик, соответственно обеспечивается высокая безопасность и отсутствует необходимость заземления;

- высокую коррозионную стойкость, стойкость к циклам замораживания и размораживания, отсутствие необходимости окраски опор в эксплуатации;

- модульно-секционную конструкцию, возможность ручной транспортировки секций, компактную укладку в транспорт;

- эффективное в силу гибкости конструкции восприятие ударных нагрузок, возникающих при пляске проводов, сбросе гололеда, коротких замыканиях, сейсмических событиях.

Указанные преимущества обеспечивают:

- возможность транспортировки и монтажа в труднодоступных местах без использования спецтехники;

- высокую скорость монтажа;

- сокращение затрат на транспортировку, особенно на дальние расстояния или в труднопроходимой местности;

- возможность вездеходной доставки;

- возможность применения в сложных климатических условиях;

- меньшие требования к изоляции и расстоянию от провода до опоры (траверсы);

- сохранение устойчивости опор после аварийных нагрузок (падение деревьев, сброс гололеда, короткие замыкания);

- продолжение работы линии даже при многочисленных про-

боях или разрушениях изоляторов;

- возможность безопасного совмещения цепей различных классов напряжений;

- возможность прокладки ВЛ в стесненных условиях.

Кроме того, одним из важнейших преимуществ композитных опор является сохранение упругости при больших прогибах и вследствие этого высокая устойчивость к аварийным нагрузкам (ветер, гололед, обрыв проводов).

Развитие данного направления позволит уменьшить число аварийных отключений электрооборудования по причине повреждения изоляторов, опор и элементов траверс ВЛ; повысить надежность линии электропередачи; сократить затраты на транспортировку при строительстве и ремонте линий; повысить эффективность грозовой защиты; увеличить срок службы опор и всей линии.

По данным [5], за рубежом композитные опоры применяются для сооружения сетей наружного освещения, а также распределительных сетей низкого, среднего и высокого напряжения. Приведем несколько примеров эффективного применения этих опор.

В Норвегии на ВЛ напряжением 132 кВ использованы композитные опоры канадского производства, основой которых являются стеклопластиковые стойки RStandart. Легкие, быстромонтируемые композитные конструкции позволили норвежской электросетевой компании в короткие сроки заменить несколько деревянных изношенных опор. Кроме композитных опор, при реализации проекта были использованы и металлические опоры в пропорции одна металлическая на три композитные [5].

Реконструкции подвергнуто около 2 км ВЛ. В итоге смонтировано на 25 % меньше опор, чем в исходном варианте. По результатам проекта сделаны выводы об эффективности использования опор ВЛ 132 кВ в труднодоступной горной местности при суровых климатических условиях.

В России также уделяется внимание композитным опорам. Так, в ОАО «ПРОМЭК» при освоении стоек из полимерных материалов особое внимание было уделено продукции канадской компании POLYCOMTEC, которая разработала серию стоек для объектов электросетевого строительства [5].

Композитные опоры для ВЛ 6–35 кВ, полностью укомплектованные отечественными электросетевыми конструкциями, выпускает ОАО «Феникс-88» (Новосибирск). Применяемая технология производства обеспечивает приемлемые электрофизические и физико-механические характеристики.

На северных объектах транспортной отрасли случаются каскадные отказы ВЛ 6 кВ на проблемных трассах ЛЭП. Решение этой задачи состоит в построении интерполяционной формулы для предсказаний допустимого количества композитных опор x на 1 км ВЛ 6–35 кВ, обеспечивающего необходимое качество их функционирования.

В качестве параметра оптимизации выбрано допустимое эксплуатацией

качество функционирования сетей (ГОСТ Р 50397–93), представленное в нашей задаче вероятностью безотказной работы ВЛ 6–35 кВ. Изменение этого параметра невозможно, поэтому воспользуемся ранговой оценкой.

Ранговый параметр имеет ограниченную дискретную область определения [4]. В нашей задаче эта область содержит два значения: да — нет. «Да» означает, что количество x опор обеспечивает необходимое качество эксплуатации ВЛ 6 кВ, «нет» — что режим сети не отвечает требованиям эксплуатации. Конечно, ранговая оценка носит субъективный характер.

По экспертным оценкам, дискретная область рангового параметра ограничивается величиной 20 % от стоимости ВЛ 6 кВ длиной 1 км на стандартных опорах, т. е. стоимость композитных опор в этой ЛЭП не должна превышать данной суммы. Иначе это приведет к росту стоимости электроэнергии, отпускаемой потребителям удаленных местностей, и соответственно вызовет рост стоимости всех услуг в этих регионах. Увеличение расходов на себестоимость производства, транспортировку грузов, эксплуатацию транспортных магистралей негативно скажется на развитии северных регионов и увеличит риски в области энергетической безопасности государства.

Параметр оптимизации является технико-экономическим. Итоговая (Ц)

стоимость строительства 1 км ВЛ 6 кВ определяется в рублях стоимостью свайных оснований (фундаментов) (С) и стоимостью опор, монтажных работ всех видов и материалов, используемых при этом (b), и представляется математической моделью

$$Ц = \psi(C, b). \quad (1)$$

Эта модель показывает значительное влияние стоимости фундаментов, состояние которых не соответствует директивным документам [4].

Представим основные факторы, влияющие на параметр оптимизации, с позиции оценки их областей определения — совокупности всех значений, которые они могут принимать.

Фактор x (количество композитных опор на ВЛ 6 кВ длиной 1 км) является аргументом функции конструктивных размеров

$$q = \varphi(x/N) \quad (2)$$

где N — количество всех опор на данной трассе, ед.

В целом конструктивная часть ВЛ характеризуется типом опор, длинами пролетов, габаритными размерами, конструкцией фаз, количеством изоляторов [5]. Основные конструктивные размеры ВЛ 6–35 кВ приведены в табл. 1.

Количество опор на трассе ВЛ 6–10 кВ длиной 1 км составляет

$$N = L/l = 13 \div 20, \quad (3)$$

Следовательно, область определения величины x находится в пределах $0 < x \leq 13 \div 20$.

Фактор N — число отказов ВЛ 6 кВ на трассе длиной 1 км, представляется функцией

$$N = x(K_{100}; K_2; K_3), \quad (4)$$

где K_{100} — показатель надежности питания приемников электроэнергетики 1-й категории и особой группы;

K_2 — 2-й категории;

K_3 — 3-й категории, согласно ПУЭ [4].

Функция N показывает, что ВЛ 6 кВ, питающая электроприемники 1-й и особой групп, а также 2-й группы, не должна иметь отказов. Но так не бывает, поэтому при определении области изменения этого фактора будем исходить от достигнутого. Число отказов за год ВЛ 6–35 кВ на 100 км ЛЭП полигона исследования составляет $N_1 = 7$, что не удовлетворяет эксплуатацию. Следовательно, желаемое число отказов на 100 км трассы N_x должно находиться в пределах

$$0 \leq N_x \leq N_1, \quad (5)$$

Приведенные характеристики параметра оптимизации и влияющих факторов соответствуют требованиям теории планирования эксперимента в части интерполяционной задачи [7]. Это позволяет представить интерполяционную формулу в виде

$$Ц = \psi(C, b) = \psi \{ q = \varphi(x/N); x(K_{100}; K_2; K_3) \}. \quad (6)$$

Областью применения этой формулы являются проблемные трассы ВЛ 6–35 кВ, на которых могут происходить каскадные отказы. Косвенным признаком этих трасс является проектная величина C (1), когда она является значительной, сравнимой с величиной b . Задача имеет единственное решение при принятых условиях и ограничениях.

Решение задачи рассмотрим применительно к электрическим сетям 6–35 кВ. При этом учитываются следующие допущения и ограничения:

– ранговый параметр не превышает 20 % стоимости проблем-

ной трассы 6–35 кВ длиной 1 км на типовых опорах;

– расчетное количество опор на трассе ВЛ 6–35 кВ длиной 1 км соответствует допустимому значению $13 \div 20$ (см. табл. 1);

– желаемое число отказов N_x ВЛ 6–35 кВ (5) после внедрения x композитных опор должно быть ниже достигнутого значения N_1 (7 отказов в год на 100 км ЛЭП), $N_x < N_1$;

– композитная опора в 5 раз и более дороже типовой, но значительно надежней — при замене всех типовых опор на трассе композитными отказы прекращаются даже в условиях сурового климата;

– используется линейная зависимость между отказами на ЛЭП и количеством композитных опор — чем больше $x \leq 13 \div 20$, тем меньше величина отказов $N_x \leq 7$.

Пусть на проблемной трассе ВЛ 6 кВ длиной 1 км находится 20 типовых опор (см. табл. 1) и стоимость одной композитной опоры в 5 раз выше

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЦЕЛЫХ РАЦИОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ЗАВИСИМОСТИ ЧИСЛА ОТКАЗОВ ОТ КОЛИЧЕСТВА КОМПОЗИТНЫХ ОПОР НА ТРАССЕ ВЛ 6–35 кВ

Таблица 2

Количество композитных опор	Интерполяционная модель монотонно убывающей функции $N_x = \varphi(x)$ при значениях $x \leq N$ и $N_1 = 7$	Абсолютная ошибка расчета ΔN , отк
13	$N_x = -0,54x + 7$	-0,06
14	$N_x = -0,5x + 7$	0
15	$N_x = -0,46x + 7$	-0,06
16	$N_x = -0,43x + 7$	-0,02
17	$N_x = -0,41x + 7$	-0,1
18	$N_x = -0,38x + 7$	-0,2
19	$N_x = -0,36x + 7$	-0,24
20	$N_x = -0,35x + 7$	-0,1

стоимости одной типовой опоры, тогда при принятом ранговом параметре и достигнутом числе отказов $N_1 = 7$, которое необходимо уменьшить, методом математического анализа получаем интерполяционную математическую модель линейной функции вида

$$N_x = -0,35x + 7. \quad (7)$$

Функция $N_x = \varphi(x)$ является монотонно убывающей, соответствует физическому смыслу решения задачи, является математической моделью целых рациональных функций (2) и (4). Полученные таким образом интерполяционные модели монотонно убывающих функций $N_x = \varphi(x)$ при различных значениях $x \leq N$ при $N_1 = 7$ приведены в табл. 2.

Абсолютные ошибки расчетов не превышают -0,25, т. е. меньше 1 (целого числа), что удовлетворяет условию решения задачи.

На рис. 1 представлены графики линейных функций $N_x = \varphi(x)$ при $N = 13$ (1) и $N = 20$ (2), а также область определения этих функций при изменении числа опор на 1 км в пределах $13 \leq N \leq 20$.

КОНСТРУКТИВНЫЕ РАЗМЕРЫ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ [5]

Таблица 1

Номинальное напряжение, кВ	Расстояние между фазами D, м	Длина пролета l, м	Высота опоры H, м	Габарит линии h, м
<1	0,5	40–50	8–9	6–7
6–10	1	50–80	10	6–7
35	3	150–200	12	6–7

Вероятность безотказной работы ВЛ 6 кВ длиной 1 км в промежутке, равном 1 году (1/год), при $N_1 = 7$ на трассе длиной 100 км можно определить по формуле

$$P_1 = e^{-\lambda_1 t} = e^{-0,07 \cdot 1} = 0,93, \quad (8)$$

где $\lambda_1 = 7/100 = 0,07$ 1/год — параметр потока отказов.

Вероятность отказа опор на этой ВЛ 6 кВ составляет

$$P_2 = 1 - e^{-\lambda_1 t} = 1 - 0,93 = 0,07. \quad (9)$$

Вероятность безотказной работы 0,93 не удовлетворяет требованиям к качеству функционирования ВЛ 6 кВ. Необходимо увеличить эту величину за счет снижения отказов ВЛ 6 кВ длиной 100 км с $N_1 = 7$ до $N_{*} = 5$.

Пусть на трассе ВЛ 6 кВ длиной 1 км находится 20 опор ($N = 20$), тогда, чтобы уменьшить число отказов на 2 ($N_1 - N_{*}$), необходимо на основании решения уравнения (7) установить

$x = 6$ композитных опор. На рис. 1 приведено также графическое решение этого уравнения.

В этом случае вероятность безотказной работы ВЛ 6 кВ длиной 1 км составит

$$P_1 = e^{-\lambda_2 t} = e^{-0,05 t} = 0,95, \quad (10)$$

где $t = 1$ год;

$$\lambda_2 (N_{*} = 5)/100 = 0,05 \text{ 1/год.}$$

Вероятность отказа опор на этой ЛЭП составит

$$P_2 = 1 - e^{-\lambda_2 t} = 1 - 0,95 = 0,05. \quad (11)$$

Таким образом, внедрение 6 композитных опор при $N = 20$ на ВЛ 6 кВ длиной 1 км повышает вероятность безотказной работы до 0,95, а вероятность отказа снижается до 0,05.

Другой случай: пусть $N = 13$, тогда, чтобы уменьшить число отказов с $N_1 = 7$ до $N'_{*} = 4$, необходимо уста-

новить на трассе ВЛ 6 кВ пять композитных опор (см. рис. 1). При этом вероятность безотказной работы увеличивается с 0,93 до 0,96.

Решение интерполяционной задачи теории планирования эксперимента по предсказанию допустимого количества композитных опор для предотвращения каскадных отказов ВЛ 6–35 кВ на трассе длиной 1 км объективно можно использовать для разработки методики снижения вероятности каскадных отказов ВЛ 6–35 кВ на удаленных объектах транспортной отрасли с суровым климатом.

В общем виде уравнение (7) представляется математической моделью

$$N_{*} = \alpha x + N_1, \quad (12)$$

при $N_1 > N_{*}$, $\alpha < 0$, $13 \leq N \leq 20$,
 $P_n = 0,2C_m, 1C_{ком} \geq 5C_{тип}$,

где N — количество опор на трассе ВЛ 6 кВ с типовыми опорами;

N_1, N_{*} — соответственно число отказов в год ВЛ 6 кВ на проблемной трассе длиной 100 км (эмпирические данные) и желаемое количество отказов;

x — количество композитных опор на проблемной трассе ВЛ 6 кВ длиной 1 км, необходимое для предотвращения каскадных отказов;

α — коэффициент связи в линейной формуле (12);

P_n — ранговый параметр (эмпирические данные), тыс. руб.;

$C_{тип}, C_{ком}$ — соответственно цена одной типовой опоры на трассе и композитной опоры, тыс. руб.;

C_m — стоимость строительства 1 км ВЛ 6 кВ с типовыми опорами, тыс. руб.

Параметры потоков отказов ВЛ 6 кВ длиной 1 км в год при различных

значениях N_1 и N_{*} определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= N_1/100 \\ \lambda_{*} &= N_{*}/100 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Вероятности безотказной работы ВЛ 6 кВ длиной 1 км в год при различных значениях λ_1 и λ_{*} определяются по формулам

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= e^{-\lambda_1 t} \\ P_{*} &= e^{-\lambda_{*} t} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где $t = 1$, год.

Вероятности отказов ВЛ 6 кВ длиной 1 км в год при различных значениях P_1 и P_{*} составляют

$$\left. \begin{aligned} p(P_1) &= 1 - P_1 = 1 - e^{-\lambda_1 t} \\ p(P_{*}) &= 1 - P_{*} = 1 - e^{-\lambda_{*} t} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Линейная функция (12) представляет прямую, проходящую через точки $A(0, N_1)$ и $N_{(13-20)}$ (рис. 1),

где $N_{13}, N_{14}, N_{15}, \dots, N_{20}$ — количество опор на ВЛ 6 кВ длиной 1 км (см. табл. 2);

$\alpha_{13}, \alpha_{14}, \alpha_{15}, \dots, \alpha_{20}$ — коэффициенты связи в уравнении (12) при различных значениях N .

Функция $N_{*} = f(x)$ монотонно убывает. Уравнение (12) имеет единственное решение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение опор для воздушных линий электропередачи, выполненных из композитных материалов, помимо экологичности и долговечности, позволяет решить немаловажную проблему — снизить вероятность каскадных отказов на линии, особенно для северных регионов, характеризующихся большим перепадом температур в течении

суток и значительными ветровыми нагрузками на опоры линий электропередачи. На представленную методику получено свидетельство о регистрации электронного ресурса № 24297 «Методика решения интерполяционной задачи по определению допустимого количества композитных опор для предотвращения каскадных отказов воздушных линий 6–35 кВ» [3]. Представленная методика позволяет определить необходимое количество композитных опор на воздушной линии электропередачи с учетом минимизации затрат на установку и достижения желаемого количества отказов на линии.

Необходимо отметить, что даже полная замена всех типовых опор на композитные не сможет обеспечить 100%-ную вероятность полного исключения отказов ВЛ. Останутся отказы, связанные с повреждением провода, арматуры и изоляции, внешние воздействия на ВЛ и много других причин. Кроме того, с появлением композитных опор могут появиться новые виды отказов, например, перекрытия из-за нарушения габаритов вследствие серьезных ветровых воздействий и гибкости композитных конструкций, так как опора не разрушается и даже не теряет форму при снятии ветровой нагрузки, но наклоняется под воздействием ветра с возможным нарушением требований нормативных документов по габаритам.

Отдельно требуют исследований вопросы сохранения заданных свойств композитных материалов в процессе длительной эксплуатации ВЛ. Эпоксидные смолы, входящие в состав композитных опор, чувствительны к ультрафиолетовому излучению, под действием которого происходит их разрушение. На опытных образцах композитных опор заметные нарушения целостности тела опоры проявлялись через 5–7 лет после начала эксплуатации опоры. В настоящее время заводы — изготовители

ОДНИМ ИЗ ВАЖНЕЙШИХ ПРЕИМУЩЕСТВ КОМПОЗИТНЫХ ОПОР ЯВЛЯЕТСЯ СОХРАНЕНИЕ УПРУГОСТИ ПРИ БОЛЬШИХ ПРОГИБАХ И ВСЛЕДСТВИЕ ЭТОГО ВЫСОКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ К АВАРИЙНЫМ НАГРУЗКАМ (ВЕТЕР, ГОЛОЛЕД, ОБРЫВ ПРОВОДОВ)

композитных опор вводят в состав эпоксидных смол присадки, повышающие стойкость этих компонентов к ультрафиолетовому излучению, что позволило повысить срок службы опоры до 100 лет и более.

ЛИТЕРАТУРА

1. Литвак В.В., Богданов Е.П. Обследование высоковольтных электрических сетей Сибири//Науч. пробл. трансп. Сиб и Дал. Вост. 2013. № 1. С. 308–310.
2. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. 2-е изд. Ростов н/Д: Феникс, 2008.
3. Свидетельство о государственной регистрации электронного ресурса № 24297. Методика решения интерполяционной задачи по определению допустимого количества композитных опор для предотвращения каскадных отказов воздушных линий 6–35 кВ/А.И. Антонов, Ю.М. Денчик, Д.А. Зубанов, Д.М. Иванов, М.Н. Иванов, Е.В. Иванова, М.Н. Романов, А.А. Руппель, В.Г. Сальников. М.: ИУО РАО ОФЭРНИО, 2019.
4. Сальников В.Г., Барсуков А.Н., Бодрухина С.С. и др. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию. Под общ. ред. А.А. Федорова. Т. 2. Электрооборудование. М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. Данилов Г.А., Денчик Ю.М., Иванова Е.В., Палагушкин Б.В., Романов М.Н., Сальников В.Г., Солнцева Е.Н. Узкобазовая промежуточная опора ВЛ 110 кВ из композитных материалов для подхода к перегрузочным терминалам портов//Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 4–1 (50). С. 175–179.

ГРАФИК ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЙ $N_{*} = f(x)$ ПРИ $N = 13$ (1) И $N = 20$ (2) И ОБЛАСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭТИХ ФУНКЦИЙ ПРИ $13 \leq N \leq 20$

Рис. 1.

