



Снижение риска коррозии

Компания CEATI выясняет механизмы развития коррозии и определяет условия, при которых она возникает.

Бадия Бэчоур (Badia Bachour), AltaLink, Даррен Вибе (Darren Wiebe), SaskPower, Алекс Могилевский (Alex Mogilevsky), CEATI International Inc., Пейман Тахери (Peyman Taheri), Matergenics Engineering, и Мехруз Заманзаде (Mehrooz Zamanzadeh), Exova

Коррозия является основной причиной разрушения стальных опор питающих и распределительных линий электропередачи в процессе их функционирования. В зависимости от характера условий эксплуатации опор их повреждения также могут способствовать механические и микробиологические воздействия. В настоящее время большинство энергетических компаний обслуживает существенное количество устаревших опор, и коррозия становится серьезной финансовой и технической проблемой.

Недавний отчет компании CEATI International Inc. «Руководство по катодной защите опор линии электропередачи» (Управление объектами воздушной электропередачи 3256) направлен на повышение информированности в энергетической отрасли о проблемах, связанных с коррозией, и является инициативой по определению методов оценки коррозии и снижения ее воздействия на объекты передачи электроэнергии. В отчете проводится глубокий анализ механизмов коррозии, характерных для опор питающих и распределительных линий, и описываются различные условия, при

которых разные виды коррозии могут возникать на отдельных частях опор, находящихся под и над землей.

Также в отчете рассматриваются различные типы фундаментов опор и соответствующие системы катодной защиты (cathodic protection — CP) для каждого из них.

Оценка риска коррозии

Когда опора корродирует до такой степени, что начинает проявляться структурная коррозия (значительные потери материала), то применение методов снижения рисков не может быть эффективным и ремонт или замена всей конструкции становится единственным возможным вариантом. В связи с этим, важной задачей является обнаружение и контроль коррозии на ранних стадиях, когда она еще не приводит к разрушению опор и, в свою очередь, к перебоям электроснабжения в системе, экологическому ущербу, травмам или гибели людей.

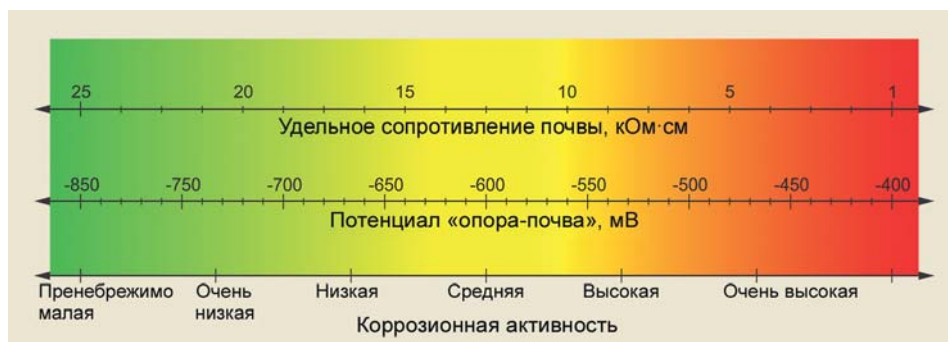
Поскольку осмотр большого числа опор не является практически целесообразным решением, рекомендуется определять порядок приоритетности тех-

нических инспекций для каждой отдельной опоры или участка линии в зависимости от риска возникновения там коррозии. Для этого необходимо произвести сбор архивных данных и вычислить показатели значимости следующих факторов:

- важность линии (определяется на основании сочетания различных факторов, таких как номинальное напряжение и близость к общественным местам);
- продолжительность эксплуатации опоры;
- тип опоры (конструкция фундамента);
- материал опоры (оцинкованная или неоцинкованная сталь);
- система заземления;
- географическое положение (с учетом коррозионной активности в условиях эксплуатации);
- близость к трубопроводам и другим источникам блуждающего тока;
- наличие системы контроля коррозии (защитное покрытие и система СР);
- данные об осмотрах и техническом обслуживании.

На основе предварительно определенных критериев, планируется технический осмотр опор, обладающих наивысшим приоритетом или показателями риска. Технические инспекции могут быть разделены на два уровня. Инспекции первого уровня фокусируются на коррозионной активности среды в условиях эксплуатации и, как правило, предполагают проведение следующих испытаний:

- измерение потенциала «опора-почва»;
- измерение сопротивления почвы;
- определение кислотности почвы (рН);



Зависимость коррозионной активности почвы от потенциала «опора-почва» и удельного сопротивления почвы.

- измерения толщины материала и защитного покрытия на уровне земли;
 - визуальный осмотр опор на уровне земли с целью обнаружения признаков коррозии.
- Основываясь на результатах инспекции первого уровня, на втором уровне технического осмотра может проводиться только для отдельных опор, расположенных в более агрессивных средах. Инспекция второго уровня включает в себя следующие шаги:
- выкапывание грунта на глубину от 0,15 до 0,9 м и очистка ржавых элементов конструкции;
 - визуальный осмотр и документальная фотосъемка (съемка крупным планом участков с признаками коррозии);
 - измерение толщины материала и защитного покрытия под землей;
 - измерение глубины коррозионных язв (ASTM G46).

Катодная защита

Катодная защита представляет собой электрохимический метод контроля коррозии. Он доказал свою эффективность и экономическую обоснованность для снижения коррозии стальных опор линий электропередачи. При применении системы катодной защиты, коррозионная реакция регулируется путем подачи электронов на опоры. Это достигается при помощи установки анодов у их оснований. Функция анодов заключается в поляризации корродирующих поверхностей конструкций защитным током. В зависимости от анодных материалов, катодные защиты системы делятся на две категории: гальванические катодные защиты и катодные защиты с наложенным током.

В гальванических катодных защитах аноды обычно называются расходными, поскольку во время защиты опор материал анодов постепенно истощается. Анодные реакции переходят на анод, закопанный вблизи от опоры и электрически соединенный с ней, для обеспечения подачи электронов. В этих условиях опора становится като-



Принципиальная схема систем катодной защиты с активными (гальваническая защита) и неактивными анодами (защита с наложенным током).

ВОЗДУШНАЯ электропередача

дом и на ее поверхности не происходит разрушительных реакций.

В отличие от трубопроводов, представляющих из себя длинные конструкции с большой площадью поверхности, фундаменты опор линий электропередачи расположены дискретно и занимают значительно меньше места. В связи с этим, применение гальванических систем катодной защиты для них является более предпочтительным вариантом по сравнению с защитами с наложенным током. Однако, системы защиты с расходуемым анодом имеют существенный недостаток, заключающийся в том, что их применение в почвах с высоким сопротивлением является неэффективным.

Проектирование анодного заземлителя

Из-за различий в характеристиках почв конструкция систем катодной защиты варьируется от одной опоры к другой, даже для опор с одинаковыми геометрическими параметрами. Тем не менее, сбор эксплуатационных данных и разработка индивидуальных систем катодной защиты для каждой отдельной

опоры линии электропередачи представляется экономически нецелесообразным решением. Вместо этого, проводится предварительный анализ с целью выбора нескольких опор, являющихся «представителями» всех аналогичных опор в линии, и для них уже выполняется полевое обследование.

Целью проектирования анодного заземлителя является установление оптимального тока защиты для элементов опоры, находящихся в земле. Это требует определения характеристик почвы на месте эксплуатации, оценки текущей коррозии опоры, выбора материала анода, расчета веса анода (в зависимости от размера опоры и требуемого срока службы системы катодной защиты), выбора количества анодов и способа их расстановки.

Детали проектирования анодного заземлителя для катодной защиты опор линий электропередачи рассматриваются в отчете «Управление объектами воздушной электропередачи 3256». Проектный срок службы систем катодной защиты с гальваническим анодом в почвенной среде составляет от 10 до 15 лет. Расход анодов (скорость истощения материала)

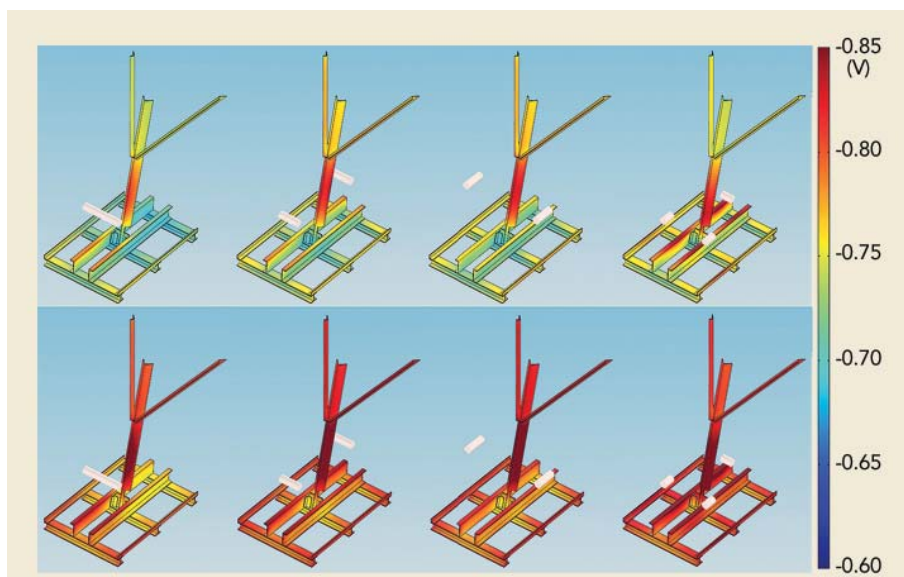
и их пассивация (образование стойкой оксидной защитной пленки) являются двумя эксплуатационными факторами, влияющими на срок службы гальванических систем защиты. Кроме того, срок службы анодов зависит от конструктивных параметров, таких как тип материала и масса.

Наиболее предпочтительными анодными материалами для использования в почве являются магний и сплавы цинка. Для магниевых анодов двумя наиболее распространенными сплавами являются высокопотенциальный сплав M1 (согласно ASTM B843), и сплав AZ-63, называемый также H1. Среди цинковых сплавов можно выделить три типа: сплавы для сильноточных цинковых анодов, цинковые сплавы на основе ASTM B418 и аноды на основе MIL-A-18001K. Важно отметить, что для катодной защиты опор использование цинковых анодов рекомендовано только при значениях удельного сопротивления почвы менее 10 000 Ом·см.

Большинство магниевых и цинковых анодов, применяемых в почвенных средах, требуют использования вокруг себя подготовленной засыпки. Аноды с засыпочными материалами, представляющими из себя, как правило, сочетание гипса, бентонита и сульфата натрия, называются анодами в засыпке. Засыпочные материалы помимо ограничения образования поверхностных пленок и предотвращения электроосмотического обезвоживания позволяют обеспечить равномерную передачу тока и равномерный расход материала. Стандартный за-



Магниевые аноды предпочтительны к использованию в катодных защитах фундаментов питающих и распределительных линий электропередачи. Для анодов в засыпке предполагается применение специального заполнителя в целях повышения их эффективности.



Распределение потенциала на поверхностях рязевых фундаментов, находящихся в земле, проиллюстрировано для различных вариантов размещения анодов. Аноды показаны в виде белых цилиндров вокруг фундамента.

сыпучный материал должен обеспечивать равномерное сопротивление 50 Ом·см при измерении методом «почвенного ящика» (soil box test method) согласно ASTM G187.

Традиционная процедура проектирования катодной защиты первоначально была разработана для систем трубопроводов. В отчете «Управление объектами воздушной электропередачи 3256» она была модифицирована и распространена на опоры линий электропередачи.

Важной частью проектирования катодной защиты является определение величины требуемого тока для защиты опоры. Этот ток можно оценить по таблицам и диаграммам, составленным на основании опыта эксплуатации или при помощи специального теста с использованием временного анодного заземлителя. Требуемый ток для катодной защиты является функцией характеристик почвы, геометрии опоры и состояния поверхности конструкции на границе между почвой и опорой. Среди важных влияющих параметров стоит отметить также площадь открытой поверхности конструкции, сопротивление покрытия, ионную проводимость почвы, ее уровень кислотности (pH), температуру и уровень аэрации.

После вычисления минимальной массы материала анода должно быть определено расположение анода (анодного заземлителя), закопанного вблизи опоры. Ключевыми вопросами при проектировании анодного заземлителя являются количество анодов, а также их удаленность относительно друг друга и опоры.

Следует определиться, использовать ли один анод с минимальной расчетной массой или несколько анодов с общей массой, эквивалентной расчетному значению. Выбор большого количества анодов, как правило, повышает эффективность системы катодной защиты, так как приводит к более равномерному распределению защитного тока. Однако, это увеличивает взаимное влияние анодов друг на

друга и — что еще более важно — влечет за собой повышение стоимости установки и обслуживания системы защиты.

После того как вопрос о количестве анодов решен, возникает задача распределения анодов вблизи опоры. В случае, если расстояние между анодом и опорой достаточно большое, сопротивление почвы приводит к существенному падению потенциала, и требуемая поляризация для катодной защиты поверхности конструкции не может быть достигнута. С другой стороны, если вышеуказанное расстояние слишком короткое, нарушается равномерность протекания тока, вследствие чего некоторые поверхности становятся избыточно защищенными, а некоторые — защищенными недостаточно.

В реальности идеальным случаем для энергетических компаний является сведение к минимуму затрат на материал анода и расходов на установку при обеспечении достаточного уровня защиты. Создание оптимизированных конструкций требует компьютерного моделирования, однако, системы автоматизированного проектирования для катодных защит в основном разработаны для трубопроводов и морских сооружений.

Разработка компьютерных моделей для систем катодной защиты может учесть ряд конструктивных особенностей, которым не уделяется внимание в традиционных методах проектирования. Традиционные методы, которые до сих пор широко применяются на практике, в основном базируются на эмпирических формулах и непосредственном опыте инженерного состава. Несмотря на свою полезность такие методы проектирования не оптимизированы и экономически неэффективны, поскольку они не могут учесть геометрические факторы и изменяющиеся параметры проектирования. В результате это приводит к необходимости обеспечения больших запасов надежности. В каких-то отдельных случаях могут быть предложены несколько вариантов расположения анодов, предполагающих обеспечение их одинаковой эффективности, но, как правило, существует только один оптимальный вариант для устройства анодного заземлителя.

Например, рязевые фундаменты имеют большое число геометрических неровностей (краев, отверстий, изгибов и стыков) и проектирование системы катодной защиты для них представляется непросто задачей. Был рассмотрен вариант установки четырех различных анодных заземлителей с горизонтальными анодами (белые цилиндры на рисунке), как показано в каждой из колонок. Результаты в верхнем ряду соответствуют нейтральной почве с удельным сопротивлением 5000 Ом·см.

Для демонстрации влияния удельного сопротивления грунта на эффективность катодной защиты

ВОЗДУШНАЯ электропередача

в нижнем ряду (на рисунке) представлены результаты моделирования при слабокислой почве с удельным сопротивлением 2000 Ом·см. В целях проведения корректного сравнения двух случаев размер анодов не изменяется, хотя очевидно, что требуемый ток катодной защиты возрастает по мере усиления коррозионной активности почвы, а это, в свою очередь, увеличивает необходимую массу анодов для обеспечения заданного срока службы катодной защиты.

Оценка эффективности

Для оценки эффективности различных конструкций анодного заземлителя было проведено исследование распределения потенциала на поверхностях фундамента в земле. В соответствии со стандартом NACE SP0169, минимальный потенциал поверхности для катодной защиты стальных конструкций составляет $-0,850$ В. По результатам моделирования темно-красные области (на рисунке) показывают защищенные части фундамента, в то время как оранжевые, желтые, зеленые и синие участки указывают на частично защищенные поверхности конструкций. Результаты четко демонстрируют, что анодные заземлители обеспечивают лучшую защиту в почвах с более низким удельным сопротивлением. Кроме того, можно заметить, как отдаленные друг от друга анодные заземлители приводят к более равномерному защитному покрытию.

Помимо прочего компьютерное моделирование показывает участки с геометрическими особенностями (различные углы и края), расположенными вблизи анодов, через которые проходит максимальный ток защиты, в то время как плоские поверхности (особенно экранированные) остаются наименее поляризованными и защищенными. В результате таких геометрических сложностей при установке ряжевых фундаментов рекомендуется использовать несколько анодов для катодной защиты.

К сказанному можно добавить, что в почвах с высокими значениями удельного сопротивления для обеспечения хорошего уровня защиты необходимо рассматривать вариант установки большого количества анодов, причем закапывать их нужно вблизи опоры (на расстоянии менее 0,6 м). Для больших ряжевых фундаментов горизонтально заложенные аноды являются более предпочтительными для защиты горизонтальных участков решетки фундамента. При этом, для защиты вертикальных участков рекомендуются вертикально заложенные аноды. Тем не менее, для обеспечения полной катодной защиты ключевых элементов фундамента, находящихся под максимальным напряжением (обычно вертикальных стоек) может потребоваться сочетание вертикальных и горизонтальных анодов.

Благодарность

Данная статья является результатом работы над «Руководством по катодной защите опор линии электропередачи» (Управление объектами воздушной электропередачи 3256), финансирование которого осуществлялось членами тематических групп компании CEATI по управлению объектами воздушной электропередачи (TLAM) и проектированию воздушных линий и борьбе с чрезвычайными ситуациями (TODM). TDWR

Бадия Бэчоур (badia.bachour@altalink.ca) — инженер-конструктор рабочей группы по техническому обслуживанию компании AltaLink в Калгари, Канада. Является профессиональным инженером Ассоциации профессиональных инженеров и геофизиков Альберты и членом Национальной ассоциации специалистов по коррозии (NACE). По результатам выполнения академических требований получила технический сертификат NACE. Занимается проектированием и внедрением способов борьбы с коррозией и защитных программ в компании AltaLink.

Даррен Виб (dwiebe@saskpower.com) — инженер, специализирующийся на линиях электропередачи. Работает в SaskPower — главной электроэнергетической компании Саскачевана, Канада. Является профессиональным инженером, проектным менеджером и имеет сертификат NACE в области катодной защит. Проводя экспертные консультации по вопросам управления и администрирования проектами, связанными с линиями электропередачи, Виб успешно выполнил большое число многомиллионных проектов и контрактов в области строительства и эксплуатации линий электропередачи 72 кВ и выше.

Алекс Могилевский (alex.mogilevsky@ceati.com) закончил Московский государственный технический университет. Обучался по направлению электротехники. Является менеджером в области передачи и распределения электроэнергии компании CEATI International Inc. Отвечает за разработку программы управления активами в области воздушной электропередачи, а также за несколько специальных программ энергетических компаний, связанных с защитой и управлением, заземлением и молниезащитой, функционированием энергетической системы и интеллектуальными сетями.

Пейман Тахери (peyman@matergenics.com) — технический директор компании Matergenics Engineering. Является профессиональным инженером и членом NACE и ASME. Имеет сертификат NACE в области катодной защиты, а также опыт работы в ее проектировании и монтаже. В различных энергетических компаниях занимался техническими инспекциями коррозии, оценкой коррозионных рисков и борьбой с ними.

Мехруз Заманзаде (zee@exova.com) — сертифицированный специалист NACE в области коррозии, покрытий, выбора материалов и катодной защиты. Имеет множество наград, в том числе, премии NACE, ASM и Colonel Cox. За время работы производил исследования в области оценки риска коррозии и анализировал связанные с ней разрушения. Занимался коррозией, покрытиями и повреждениями материалов в строительной, нефтяной и газовой индустрии, а также проблемами устаревающего оборудования энергетических компаний и авиации.

Больше информации на:
CEATI International | www.ceati.com

КОММЕНТАРИЙ

**Любовь КАЧАНОВСКАЯ, к.т.н., заведующая НИЛКЭС
ООО «ПО «Энергожелезобетонинвест»**



Настоящая статья, написанная на базе отчета компании CEATI International Inc., дает общие представления о методике обследования опор ВЛ на предмет оценки их коррозионного поражения и предлагаемых путей защиты стальных элементов, находящихся над и под землей. Обращает на себя внимание задача, которую ставят авторы — повышение информированности специалистов энергетической отрасли с проблемами, связанными с коррозией конструкций и предлагаемыми решениями по снижению рисков разрушения конструкций по этой причине.

Вопросы, поднимаемые авторами статьи, актуальны и для нашей страны, так как кроме наличия в энергосистемах большого количества старых опор, в настоящее время широкое распространение получили стальные фундаменты различных конструкций: в том числе в виде свай — оболочек большого диаметра, забивных или винтовых.

Безусловно важным является общий подход к оценке рисков коррозии систем защиты с учетом их стоимости при установке и при эксплуатации. В статье указано, что если разрушения от коррозии значительны, то уже поздно думать о способах защиты — необходимо принимать меры по усилению или замене конструкций. Вопрос защиты от коррозии существующих опор должен быть решен на начальной стадии эксплуатации ВЛ с учетом реальных условий в районе прохождения трассы.

Авторы экономически обосновывают целесообразность проведения обследований в 3 этапа:

- сбор архивных данных для выявления участков ВЛ, подверженных наибольшему риску разрушений от коррозии;
- инспекцию коррозионной активности среды (с проведением измерений потенциала «опора-почва», сопротивления почвы и ее кислотности), визуальным осмотром опоры на уровне земли (в месте максимальной коррозионной активности);
- обследование состояния отдельных опор с измерением коррозионных потерь элементов, находящихся в наиболее агрессивных условиях с откопкой грунта в переходной зоне (15 см выше и 90 см ниже уровня грунта).

Предлагаемые методики обследования конструкций для принятия решения

о путях снижения рисков их разрушения от коррозии используются в нашей стране достаточно давно. Считаем, что использование трехэтапного подхода к обследованию опор позволит, при необходимости, привлекать на каждой стадии специалистов различного профиля.

В статье предлагается к использованию катодная защита конструкций, причем предпочтение для опор ВЛ отдается гальваническому варианту, при котором организуется подача электронов от анодов (расходоуемых элементов), закопанных вблизи опоры и электрически соединенных с ней, к основному металлу конструкций. Указывается, что для обеспечения защиты на 10–15 лет необходимо учитывать большое количество характеристик почвы, конструктивные решения опор и фундаментов, перепады температуры, уровень аэрации. Для определения оптимального места установки и массы анодов требуется использование компьютерного моделирования, приспособления к использованию автоматизированного проектирования катодных защит, которое разработано в настоящее время только для трубопроводов и морских сооружений.

Вопрос защиты стальных элементов опор в нашей стране решается на стадии проектирования и изготовления конструкций путем нанесения на все элементы опор цинкового покрытия, которое является одним из вариантов систем «катодной защиты». Гальваническая пара «цинк-сталь» работает таким образом, что основной металл конструкции надежно защищен, пока не израсходован весь цинк защитного покрытия. Опыт использования оцинкованных типовых конструкций с начала 1970-х годов подтверждает факт надежной защиты элементов опор в большинстве условий эксплуатации. Опыта использования большого количества металлических фундаментов в районах с повышенной степенью коррозионной активности пока еще не достаточно. Нет и нормативной методической документации, которая помогала бы при проектировании принимать экономически обоснованные решения.

Считаем необходимым разрабатывать на уровне СТО ПАО «Россети» «Рекомендации по защите стальных фундаментов опор в зависимости от их конструктивных особенностей и условий их эксплуатации».



Фундаменты высотных опор ВЛ 220 кВ Черепеть-Орбита-Спутник-Калужская, 2012 г.